

Г.С. Арсеньев

**ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ  
ПРОЦЕССАМИ:  
ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ**



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию

---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Г.С. Арсеньев

# ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ: ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

*Допущено Министерством образования и науки Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Гидрология» направления  
подготовки дипломированных специалистов «Гидрометеорология»*



Санкт-Петербург  
2005



**УДК 556.048:556.18:621.22**

Арсеньев Г.С. Основы управления гидрологическими процессами: водные ресурсы. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2005 - 231 с.

**ISBN 5-86813-140-1**

*Рецензенты:* кафедра возобновляющих источников энергии и гидроэнергетики СПбГТУ (Президент СПбГТУ академик РАН Васильев Ю.С., проф. д-р техн. наук Масликов В.И.), Рождественский А.В., д-р техн. наук, проф. (отдел Водного кадастра ГГИ)

Даны методы и практические приемы управления водными ресурсами с учетом природоохранных требований. Особое внимание уделено разработке водохозяйственных балансов, как основы для проведения регулирования стока; разработке диспетчерских графиков режимов работы водохранилищ с целью эффективности использования их водных ресурсов, а также противопаводковой роли водохранилищ и расчету пропуска половодий и паводков через каскады гидроузлов.

Предназначен для студентов гидрометеорологических университетов по специальности «гидрология суши» и «геоэкология». Может быть полезен для специалистов в области водохозяйственного и гидроэнергетического проектирования.

Arsenyev, G.S. Fundamentals of hydrological processes management: water resources. A textbook. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2005 – 231 pp.

Methods and practical techniques of water resources management are presented with allowance for nature protection requirements. Special attention is given to development of water-economic balances as the basis for realization of flow regulation, development of control operation regimes of reservoirs aiming at their water resource efficiency, as well as the flood control role of reservoirs, and to calculation of high waters and flood discharge through cascades of hydrosystems.

For students of hydrometeorological universities specializing in Land Hydrology and Geoecology. The book can be useful to experts in the field of water-economic and hydropower design.

**ISBN 5-86813-140-1**

- © Г.С. Арсеньев, 2005
- © Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2005

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Основы управления водными ресурсами» относится к специальным дисциплинам гидрологического цикла, завершающего подготовку дипломированного специалиста. Она имеет четкую практическую направленность, знакомя студентов с методами использования водных ресурсов и способами управления ими при водохозяйственном и гидроэнергетическом проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений и водных объектов.

В целом изучаемая дисциплина является составной частью инженерной гидрологии и опирается на такие дисциплины, как общая гидрология, гидрологические расчеты, общая и речная гидравлика, мониторинг и охрана вод суши и др.

Целью преподавания этой дисциплины является подготовка специалистов, способных самостоятельно решать задачи управления водными ресурсами.

Задачей дисциплины является изучение направлений использования водных ресурсов, теории и практических приемов перераспределения водных ресурсов во времени и по территории.

В результате изучения дисциплины дипломированный специалист должен знать:

- приемы решения вопросов эффективного использования водных ресурсов отраслями хозяйства;
- современные методы инженерного расчета регулирования стока.

Должен уметь:

- разрабатывать водохозяйственные балансы и на их основе намечать водохозяйственные мероприятия по увеличению располагаемых к использованию водных ресурсов и покрытию выявленных дефицитов стока на рассматриваемой территории;
- определять водноэнергетический потенциал водотоков;
- выполнять расчеты по выбору основных параметров водохранилища и гидроузлов;
- разрабатывать и составлять правила использования водных ресурсов водохранилищ гидроузлов комплексного назначения.

Должен обладать навыками самостоятельного решения гидрологических задач при водохозяйственном и водноэнергетическом проектировании.

При изложении материала автор стремился сохранить то лучшее, что было в учебниках В.А. Бахтиарова, авторских коллективах

Санкт-Петербургского политехнического университета и Московского энергетического университета, учебном пособии С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, в книгах А.Е. Асарина и К.Н. Бестужевой, а также А.Ш. Резниковского. Кроме того, учтен большой опыт в разработке методологии управления водными ресурсами Института водных проблем Российской Академии Наук (ИВП РАН), проектных и научно-исследовательских институтов Гидропроект, Ленгидропроект и Энергосетьпроект.

Учебник состоит из трех разделов, которые подразделены на 16 глав.

Первый раздел включает в себя основные сведения о водных и водноэнергетических ресурсах Российской Федерации (в дальнейшем – России). При изучении материала первых двух глав особое внимание следует обратить на распределение водных и водноэнергетических ресурсов по территории России, изменение водных ресурсов под воздействием хозяйственной деятельности, а также причины слабого использования богатейшего водноэнергетического потенциала рек России.

Во втором разделе приведен состав гидрологических данных для водохозяйственного и гидроэнергетического проектирования. Приведены особенности гидрологического обоснования озерных водохранилищ. Здесь же даются методы проведения расчетов регулирования стока по наблюдаемым стоковым рядам. Их достоинства и недостатки.

Третий раздел освещает существующие методы и практические приемы управления водными ресурсами.

Целесообразно особое внимание обратить на главу 5, в которой рассматривается методология разработки водохозяйственных балансов, а главное – современная проблема установления экологического стока ниже регулирующих сооружений. Эта проблема является отправной для разработки правил управления водными ресурсами водохранилищ.

В главе 6 даны типы и назначения водохранилищ, виды осуществляемого ими регулирования стока, показано влияние водохранилищ на окружающую среду. Знакомство с источниками воздействия на окружающую среду и меры по ее охране явятся действенным шагом в направлении экологического образования современного специалиста-гидролога. Специального осмысления требуют излагаемые в этой главе основные направления по снижению затопления земель при соз-

дании водохранилищ, а также другие мероприятия по увеличению располагаемых к использованию водных ресурсов.

В главах с 7 по 12 включительно освещаются существующие методы и практические приемы расчетов сезонного и многолетнего, а также каскадного регулирования речного стока. Здесь же приведен и обоснован порядок водноэнергетических и гидравлических расчетов при водохозяйственном проектировании. В связи со сложностью разработки правил управления водными ресурсами водохранилищ данный вопрос выделен в самостоятельную главу 14 после разбора методики и практических приемов регулирования стока. Для лучшего освоения теоретического материала в учебнике после каждой главы помещены контрольные вопросы, охватывающие основные положения изложенного в главе материала и одновременно помогающие его систематизировать.

Закрепление теоретического материала учебника в процессе обучения должно осуществляться при выполнении студентами лабораторных заданий с использованием практикума [7] пособия [13].

Поскольку книга имеет главным образом учебное назначение, в ней, как правило, отсутствуют ссылки на использованную в соответствии с прилагаемым перечнем литературу. Указанный список литературы следует также рассматривать и как рекомендации тех источников, в которых читатель может найти более подробные сведения по изучаемому вопросу.

Учитывая, что наука и жизнь быстро прогрессируют, необходимо следить за новыми публикациями, появляющимися в печати, читать специализированные журналы, справочную и нормативную литературу.

При подготовке рукописи к печати неоценимую помощь оказали автору рецензенты: президент СПбГПУ академик РАН Ю.С. Васильев, д-р техн. наук, профессор кафедры возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского политехнического университета В.И. Масликов, д-р техн. наук, проф. А.В. Рождественский за что автор выражает им глубокую благодарность.

Автор благодарит доцента кафедры гидрологии суши А.В. Сикана и инженеров Н.Г. Малышеву и Е.Е. Пузикovu за подготовку рукописи к изданию.

## ВВЕДЕНИЕ

Мировой опыт, включая Россию, показывает, что наиболее распространенным и эффективным средством управления водными ресурсами и решения многих водных проблем является регулирование стока водохранилищами. Доказательством этого может служить создание каскадов водохранилищ и ГЭС многоцелевого назначения в бассейнах рек Енисея и Ангары, Волги и Камы, Сулака и др. Водоохранилища, перераспределяя воду из многоводных сезонов и периодов в маловодные, существенно увеличивают доступные к использованию водные ресурсы и тем самым гарантируют все виды водоснабжения, создают условия для эффективного использования гидроэнергетического потенциала рек, улучшают санитарное состояние рек. Каскадное использование рек позволяет перейти на единые транспортные глубоководные пути. Водоохранилища, как мощные аккумуляторы воды и энергии, в недалеком будущем могут способствовать созданию «энергетических ансамблей» – ГЭС и ПЭС; ГЭС, ПЭС и АЭС и др.

Наряду с большой пользой, создание водохранилищ сопровождается известными негативными последствиями. Многие из них вызваны безнравственным отношением к новым, весьма чувствительным географическим образованиям. Так, например, обрушению берегов водохранилищ способствует распашка земель вплоть до уреза, строительство дачных поселков, отсутствие действенной водоохранной зоны по периметру водохранилищ. Цветение воды и, как следствие, ухудшение ее качества – результат выпуска в водохранилища неочищенных и слабо очищенных сточных вод и вод с сельхозугодий, а также грубая подготовка ложа водохранилища к затоплению. Возможные негативные явления на протяжении нижних бьефов в настоящее время смягчаются или ликвидируются путем диспетчерского ограничения режима попусков из водохранилища в соответствии со складывающейся гидрометеорологической и социальной обстановкой.

Для разрешения многочисленных противоречий при подготовке к эксплуатации водохранилищ и повсеместного превращения их в хранилища чистой воды и производителей биопродукции, наряду с осуществлением хорошо известных организационных, технологических, экономических и экологических мероприятий, специали-

стами ИВП РАН [4] предлагается к разработке оригинальная концепция, состоящая из трех взаимосвязанных элементов.

1. Обоснование необходимости утверждения статуса водохранилища как биогеосистемы, основной задачей которой является производство воды надлежащего качества для обеспечения нормального функционирования как водных, так и наземных экосистем. Это в первую очередь относится к равнинным водохранилищам, расположенным в освоенных районах с высокой плотностью населения.

2. Обоснование необходимости осуществления всех видов хозяйственного использования водохранилищ, в том числе и регулирование ими стока лишь в пределах, не нарушающих нормального функционирования экосистем.

3. Обоснование необходимости улучшения использования и охраны природных ресурсов акваторий и береговых зон водохранилищ на основе организации их пространственной и функциональной структуры путем районирования, планировки и обустройства.

Основой управления водноресурсными системами служат водохозяйственные балансы – сопоставление располагаемых водных ресурсов с потребностями в воде. Методология составления водохозяйственных балансов разработана достаточно давно. Однако ряд положений требует уточнения или даже решения. К ним относятся, в частности, следующие. Годовое водопотребление на конкретную дату обычно оценивается однозначно, однако оно подвержено значительным колебаниям как по величине, так и в течение года. Так, например, в зоне неустойчивого увлажнения различие в испарении влажных и сухих лет достигает двух-трех раз, а максимальная ордината гидрографа может изменять свое календарное положение до 2-х месяцев. Учесть изложенное, по-видимому, возможно только путем разработки стохастических моделей водопотребления, дифференцирования по его видам для различных физико-географических зон и т.п.

На большинстве крупных речных систем основная доля расходной части водохозяйственного баланса обычно приходится на осуществление специальных попусков воды, необходимых для обеспечения работы гидроэлектростанций и водного транспорта, для обводнения пойменных угодий, поддержания должного по санитарным требованиям качества вод, отвечающих требованиям речных и околоречных экосистем и создающих приток к устьевому

створу для поддержания заданного водно-солевого режима водоемов, принимающих реку.

В настоящее время каких-либо однозначных приемов установления попусков, кроме судоводных и сельскохозяйственных, отвечающих требованиям охраны окружающей среды, пока нет. Сложившаяся практика назначения экологических, в том числе и санитарных, попусков воды по величине естественного минимума летне-осенней или зимней межени не имеет научной основы и может приводить к искусственному занижению дефицитов водных ресурсов при расчетах водохозяйственных балансов на перспективу. Данный вопрос требует безотлагательного решения с учетом обоснованных критериев допустимости воздействия на природные комплексы.

Все попуски подвержены межгодовым и внутригодовым колебаниям, что требует разработки водохозяйственных балансов по многолетнему стоковому периоду или большому количеству моделей межгодового и внутригодового распределения.

По итогам водохозяйственных балансов для некоторого расчетного уровня можно выделить:

- положительный баланс, когда для всех расчетных интервалов времени объем приходной части баланса больше расходной части, и дополнительных водохозяйственных мероприятий на данном уровне не требуется. При этом складывающийся избыток водных ресурсов в регионе позволяет осваивать новые виды водопользования, не ущемляя существующие;
- увязанный баланс, при котором наблюдается динамическое равновесие между приходной и расходной частями баланса. В этом случае для развития водозабора в регионе необходимо или проведение специальных водохозяйственных мероприятий по увеличению располагаемых водных ресурсов внутри региона, или переброска вод извне;
- отрицательный баланс, когда наличные водные ресурсы региона недостаточны для удовлетворения потребности в воде с необходимой степенью обеспеченности, включая требования к расходам воды ниже створа разработки баланса. При дефиците воды в отдельные расчетные интервалы времени и отсутствии его в годовом балансе маловодного года возникает необходимость в проведении сезонного регулирования стока водохранилищем, т.е. в перераспре-

делении стока из многоводного сезона (половодье) на межень. Отсутствие дефицита стока лишь в балансе среднего по водности года показывает на необходимость проведения многолетнего регулирования стока или привлечения дополнительных источников; дефицит в балансе среднего по водности года может быть устранен только путем привлечения в рассматриваемый бассейн вод извне.

Следовательно, для ликвидации выявленных дефицитов стока намечают водохозяйственные мероприятия (регулирование стока, подача его из смежных бассейнов), достаточность которых проверяют повторным водобалансовым расчетом. На основании отрицательного водохозяйственного баланса может быть сделан вывод о необходимости ограничения роста водопотребления, т.е. об отказе от развития в бассейне той или иной водоемкой отрасли.

В настоящее время практически все бассейны южной зоны России характеризуются напряженным или отрицательным водохозяйственным балансом (Волга, Урал, Дон, Кубань и др.).

Сведение водохозяйственных балансов бассейнов южной зоны в обозримой и особенно в отдаленной перспективах возможно за счет форсирования следующих основных мероприятий: экономного использования водных ресурсов и научно-обоснованного снижения норм водопотребления; строительства гидроузлов с крупными водохранилищами, регулирующими речной сток в соответствии с заданным режимом водопотребления; более интенсивного вовлечения в хозяйственное использование подземных вод; привлечения в южную зону части стока из районов, богатых водными ресурсами.

До настоящего времени нет единой цифры общего количества водохранилищ в России. Так, по данным ЦНИИКИВРа (Минск, 1986 г.) на начало 1986 г. в России функционировало 2226 водохранилищ, суммарный полезный объем которых составлял 334,2 км<sup>3</sup>. В издании РосНИИВХ [24] появляются соответствующие цифры 2650 водохранилищ и 342 км<sup>3</sup>. По-видимому, ближе к истине цифры, приведенные А.Б. Авакяном [1]. По его данным, на территории России находится свыше 2000 водохранилищ, из них прошли паспортизацию 1162 водохранилища. Площадь водного зеркала последних составляет 115 400 км<sup>2</sup>, в том числе подпертых озер – 52 600 км<sup>2</sup>, их полный объем равен 924,5 км<sup>3</sup>, полезный – 433,5 км<sup>3</sup>. Наиболее крупные водохранилища созданы при гидроэлектростанциях. В пределах России таких водохранилищ (с полным объемом

более 1 км<sup>3</sup>) насчитывается 49. На их долю приходится 92,8% суммарной площади водной поверхности всех водохранилищ, 96,4% полного и 95,4% полезного объемов водохранилищ.

В соответствии с Водным кодексом Российской Федерации использование и охрана водных ресурсов водохранилищ осуществляется исходя из требований, согласованных с заинтересованными органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации: со специально уполномоченными государственными органами в области охраны окружающей природной среды, государственным органом санитарно-эпидемиологического надзора, государственным органом управления за использованием и охраной рыбных ресурсов и другими заинтересованными органами управления.

Основным документом, регламентирующим принципы и методы управления стоком рек с максимально возможным учетом интересов водопользователей и безопасности подпорных сооружений гидроузла, населения и хозяйства в его нижнем бьефе, являются «Основные правила или основные положения правил использования водных ресурсов водохранилищ».

«Правила» являются средством обеспечения оптимального использования водных ресурсов в интересах всех водопользователей в условиях неопределенности исходной гидрологической информации и представляются в виде собственно диспетчерских правил и диспетчерских графиков.

Наряду с водными ресурсами Россия обладает значительными водноэнергетическими ресурсами, по запасам которых она занимает второе после Китая место в мире. Однако по освоению экономического водноэнергетического потенциала, оцениваемого в 850 млрд. кВт. ч среднегодовой выработки электроэнергии, Россию опережает большинство промышленно-развитых стран. Так, если в США освоено 73,3% экономически эффективного потенциала, в Канаде – 42%, Японии – 78%, Италии – 65%, Франции – 85%, Норвегии – 54%, Швеции – 66%, то в России эта цифра составляет 22% (в европейской части – 40%, в Сибири – 31%, на Дальнем Востоке – 7%). В настоящее время в России эксплуатируется 98 гидроэлектростанций (ГЭС) суммарной установленной мощностью 44 млн кВт, а производство электро-энергии на них составляет 156–170 млрд кВт.ч. Кроме того, 16 ГЭС строится.

К основным факторам, сдерживающим развитие гидро-энергетики, следует отнести следующие: большие единовременные

капитальные вложения на строительство ГЭС, превышающие таковые по альтернативным электростанциям (без топливных баз) в 2 раза, и значительная продолжительность их строительства (15–20 лет и более). Это связано с возведением дорогостоящего и сложного подпорного сооружения и подготовкой зоны будущего водохранилища. С учетом современных технологий строительства пуск первого агрегата ГЭС реально осуществить на 5 – 7-й год от начала строительства гидроузла.

Социальная и экологическая ненадежность энерговодохозяйственных комплексов, включая и водохранилища, сдерживает реализацию проектов большой группы гидроэнергетических и водохозяйственных объектов. Для решения этих вопросов при обосновании проектов строительства того или иного гидроузла, в составе которого создается водохранилище, необходимы, по-видимому, следующие мероприятия: заблаговременная широкая гласность и информированность населения о строительстве предполагаемого объекта, его эффективности и возможных экологических последствиях (при этом общественность должна быть информирована и о влиянии альтернативных объектов на окружающую среду); широкое привлечение специалистов-естественников для комплексной экспертной оценки экологических последствий гидротехнического и гидроэнергетического строительства; срочная разработка нормативно-справочных документов для экологических прогнозов, включая жестко формулируемые требования окружающей среды к режиму водных объектов, критерии допустимости того или иного воздействия на природные комплексы, а также методы научно обоснованной экономической оценки ущерба от недодачи воды и электроэнергии отдельным участникам энерговодохозяйственных комплексов. Реализация указанных мероприятий будет способствовать выбору таких объектов в перспективном энерговодохозяйственном строительстве, которые будут гарантировать получение наибольшего суммарного хозяйственного эффекта при минимуме отчуждений земель и нарушений в экологической обстановке.

## Раздел 1. ВОДНЫЕ И ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

### Глава 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

#### 1.1. Возобновляемые водные ресурсы и их распределение по территории

Объем речного стока, формирующегося на территории России, составляет 4030 км<sup>3</sup> в год (10% мирового стока), или 237 тыс. м<sup>3</sup> в год на один квадратный километр территории и 27,82 тыс. м<sup>3</sup> в год на одного жителя. Дополнительный сток из сопредельных государств равен 227 км<sup>3</sup> в год.

По территории России протекает свыше 2,5 миллионов малых рек, формирующих около половины суммарного объема речного стока. Из них 127 тысяч используется для нужд населения и хозяйственного комплекса; в бассейнах этих рек проживает до 44% городского и почти 90% сельского населения страны.

Таблица 1.1

Средние многолетние естественные ресурсы речного стока в Российской Федерации

Экономический район	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Средний годовой сток, км <sup>3</sup>			Удельная водообеспеченность, тыс. м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup>
		местный сток	приток из сопредельных районов	общие ресурсы	
Северный	1466,3	494	17,6	512	336,9
Северо-Западный*	211,6	50,4	62	112,4	298
Центральный	485,1	88,6	24	112,6	182,6
Центрально-Черноземный	167,7	16,1	4,93	21	96
Волго-Вятский	263,3	47,8	104	151,8	181,5
Поволжский	536,4	31,5	239	270	58,7
Северо-Кавказский	355,1	44	25,3	69,3	123,9
Уральский	824	122,7	6,21	129	148,9
Западно-Сибирский	2427,2	51,3	72,3	585	211,4
Восточно-Сибирский	4122,8	1097	34,8	1132	266,1
Дальневосточный	6215,9	1538,5	273	1811,5	247,5
Российская Федерация	17075,4	4043,6	227	4270	236,7

\* Вместе с Калининградской областью.

Общая площадь Российской Федерации составляет 17075,4 тыс. км<sup>2</sup>. В пределах ее границ расположено 11 экономических районов. Разнообразие климата и почвенного покрова, различные залесенность и заболоченность, орографические, геологические, гидрогеологические особенности формирования речного стока приводят к крайне неравномерному распределению водности рек по территории. Это, в частности, отражается на величине среднегодовых и удельных водных ресурсов (табл. 1.1).

Таблица 1.2

**Распределение речного стока по бассейнам с площадями водосбора более 200 тыс. км<sup>2</sup>**

Река	Площадь водосбора, тыс. км <sup>2</sup>	Куда впадает	Средний многолетний годовой сток в устье, км <sup>3</sup>
Дон	422	Азовское море	28,1
Волга	1360	Каспийское море	251
Ока	245	Волга	41
Кама	507	Волга	118,9
Урал	237	Каспийское море	10,1
Северная Двина	357	Белое море	109
Печора	322	Баренцево море	130
Обь	2990	Обская губа	400
Иртыш	1643	Обь	89,3
Енисей	2580	Карское море	630
Ангара	1039	Енисей	160,9
Подкаменная Тунгуска	240	Енисей	49,5
Нижняя Тунгуска	473	Енисей	116,1
Селенга	447	Енисей	30,6
Хатанга	364	Море Лаптевых	104,7
Оленек	219	Море Лаптевых	38,2
Лена	2490	Море Лаптевых	532
Витим	225	Лена	69,4
Олекма	210	Лена	61,5
Алдан	729	Лена	161,2
Вилюй	454	Лена	46,7
Яна	238	Море Лаптевых	31,5
Индибирка	360	Восточно-Сибирское море	58,3
Колыма	647	Восточно-Сибирское море	123
Амур	1855	Охотское море	344
Шилка	206	Амур	17,4
Зея	233	Амур	59,9

Из таблицы видно, что на Европейскую территорию России приходится только 22% общих водных ресурсов, а здесь проживает около 80% населения России и столько же производится промышленной и сельскохозяйственной продукции. На Азиатскую территорию России приходится соответственно 78% суммарных возобновляемых водных ресурсов.

Около 60% суммарного стока рек сбрасывается в окраинные моря Северного Ледовитого океана. К этому водному бассейну относятся такие речные гиганты, как Обь, Енисей и Лена, а также менее крупные реки – Северная Двина, Печора, Яна, Индигирка, Колыма.

Данные о речном стоке основных бассейнов приведены в табл. 1.2.

Рекам России свойственно и крайне неравномерное распределение стока внутри года. Это связано с ярко выраженным весенним половодьем, проходящим в сравнительно небольшие промежутки времени и затяжной летне-осенней и зимней меженью. Большие паводки летом отмечаются только при интенсивных дождях и при хорошем предшествующем увлажнении водосбора.

Внутригодовое распределение стока рек по некоторым регионам России дано в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Внутригодовое распределение стока по некоторым регионам России

Регион	Сезонный сток, % от годового		
	весна	лето-осень	зима
Север европейской территории	55–65	25–35	10–20
Запад и юго-запад европейской территории	30–50	30–35	20–35
Южное Заволжье, Южное Приуралье	90–95	4–8	1–2
Крайний север и северо-восток Сибири	40–50	45–55	5
Западная Сибирь	45–55	35–45	10
Восточная Сибирь, Урал	70–80	15–25	5
Забайкалье, Яно-Индигирский район, Дальний Восток, Камчатка	30–40	55–65	5

Из таблицы видно, что на реках регионов России более 50% объема годового стока приходится на 2–3 половодных месяца.

Территориальная неравномерность распределения, большая внутригодовая и многолетняя изменчивость речного стока затрудняют обеспечение населения и хозяйства страны необходимым ко-

личеством воды. Эта проблема решается за счет регулирования стока рек водохранилищами.

## **1.2. Комплексное использование водных ресурсов и связь их с природными и экономическими условиями**

Наличие водных ресурсов является неременным условием, обеспечивающим практически все виды хозяйственной деятельности человека. В течение длительного периода водопользования сформировались следующие основные отрасли водного хозяйства:

- водоснабжение городов и поселков, промышленных предприятий, сельскохозяйственных, транспортных и энергетических (тепловых и атомных электростанций);
- мелиорация – использование воды для орошения и обводнения и отвод избыточных вод с территории (осушение);
- гидроэнергетика – использование энергии воды;
- водный транспорт – использование воды для судоходства и лесосплава;
- рыбное хозяйство – разведение и лов рыбы.

Кроме перечисленных основных отраслей водного хозяйства, следует указать и другие направления в использовании вод: для санитарного благоустройства, организации отдыха населения (рекреаций). Одной из отраслей водного хозяйства является борьба с вредными и разрушительными действиями воды, в частности с наводнениями. В современный период важнейшее значение приобретает защита водных источников от истощения и загрязнения, так как последние приняли угрожающий характер и создали целый ряд экологических проблем.

В каждом регионе наибольшее развитие получают те отрасли водного хозяйства, которые отвечают естественно-историческим условиям и специализации хозяйства региона. Так, орошение и обводнение играют ведущую роль в зоне недостаточного увлажнения или в районах с неблагоприятным для растениеводства внутригодовым распределением осадков, например, в районах Южного Поволжья и др.

В зоне избыточного увлажнения (северо-западные и северные области Европейской части России) главное направление водного хозяйства – осушение болот и заболоченных земель. Это позволяет ввести в оборот дополнительные площади обрабатываемых земель,

расширить другие отрасли сельскохозяйственного производства, например животноводство.

В современный период отмечается сглаживание границ между районами орошения и осушения. Орошение стало распространяться далеко на север, например в Ленинградской области, которая имеет хорошее естественное увлажнение, однако не всегда режим этого увлажнения отвечает потребности вегетации растений.

В настоящее время наблюдается тенденция совмещать эти два противоположных по характеру мелиоративных мероприятия – орошение и осушение в пределах одной мелиоративной системы двойного действия: в период избытка почвенной влаги система действует как осушительная, а в период недостатка влаги – как оросительная.

Гидроэнергетика получила большое развитие в тех районах, где имеются запасы водной энергии и большая потребность в электрической энергии для развития индустрии района, электрификации железнодорожного транспорта и др. В период индустриализации хозяйства и его восстановления после войны были освоены энергетические ресурсы равнинных рек Европейской части России. В 60-е годы началось строительство ГЭС на реках Сибири и Дальнего Востока, что связано с их интенсивным хозяйственным освоением.

В районах с муссонным климатом (Дальний Восток), подверженных частым и разрушительным затоплениям дождевыми водами, одной из ведущих отраслей водного хозяйства является борьба с наводнениями.

В других природных и экономических условиях основным направлением в развитии водного хозяйства может быть водоснабжение, водный транспорт, рыбное хозяйство, рекреации и т.п.

Стремление получить от природных богатств наибольший эффект способствовало развитию комплексного использования водных ресурсов.

*Комплексным* называется такое использование водных ресурсов, при котором одновременно и притом наиболее целесообразно и с наименьшими затратами решаются задачи нескольких отраслей хозяйства. В связи с этим проектируемые и строящиеся водохозяйственные объекты (водохранилище, каналы) имеют многоцелевое назначение.

Многоцелевое использование водохозяйственных объектов имеет большое преимущество по сравнению с их отдельным использованием каждой отрасли, однако при этом возникает сложная задача увязки интересов различных участников комплекса. Решение этой задачи усложняется наличием противоречивости интересов разных отраслей. Так, режим использования воды, например, гидроэнергетикой, резко отличается от режима ее использования на орошение. Требования водного транспорта также противоположны требованиям энергетики. Особенно резкие противоречия возникают между запросами гидроэнергетики и мелиорации в районах недостаточного увлажнения. Сбросы воды из водохранилища для создания искусственного половодья преследуют рыбохозяйственные, санитарные, экологические, транспортные цели, а также способствуют удалению различных естественных и антропогенных отходов. Для гидроэнергетики холостые (помимо турбин) сбросы вод являются ощутимой потерей в выработке электроэнергии, а соблюдение установленного режима работы ГЭС занимает центральное место при ее эксплуатации.

Оптимальное распределение водных ресурсов региона между отраслями при наличии противоречивости интересов разных водопользователей возможно только с учетом требований комплексного использования водных ресурсов, их экономической эффективности, сохранения экологического благополучия в водных объектах и их окружении.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите суммарные возобновляемые водные ресурсы России.
2. Как водные ресурсы России распределяются по территории и увязываются при этом с демографией и развитием промышленного и сельскохозяйственного производства?
3. Назовите проценты распределения речного стока по сезонам года.
4. Как решается проблема территориальной и внутригодовой неравномерности речного стока?
5. В чем привлекательность комплексного подхода к использованию водных ресурсов?
6. Существует ли связь использования водных ресурсов с природными и экологическими условиями регионов?

## Глава 2. ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ

### 2.1. Методы определения водноэнергетических ресурсов и трудности их реализации

Основные принципы определения водноэнергетических (гидроэнергетических) ресурсов рассмотрены в трудах А.Н. Вознесенского, С.В. Григорьева, Н.К. Малинина, И.А. Термана и др.

Гидравлическая энергия рек представляет собой работу, которую совершает текущая в них вода. Силой, осуществляющей эту работу, является вес воды, а направление силы – падение рек, т.е. разность уровней в начале и в конце участка реки (рис. 2.1).

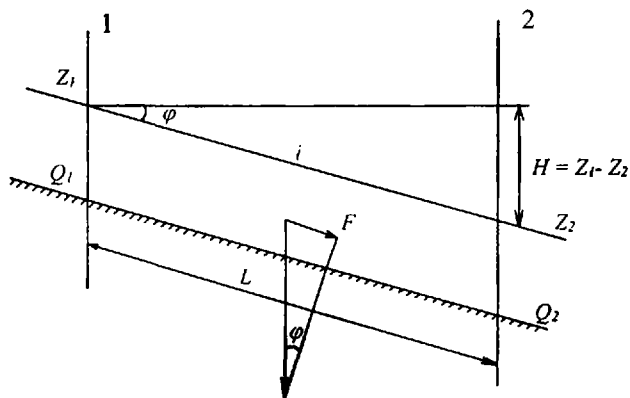


Рис. 2.1. Схема определения потенциальных водноэнергетических ресурсов на расчетном участке реки.

Числовое значение этой работы можно определить следующим образом. Пусть имеется участок водотока длиной  $L$ . При поперечном сечении водотока  $\omega$  объем воды на этом участке равен  $\omega L$ , а ее масса  $m = \rho \omega L$ . Работа, совершаемая силой влечения воды,  $F = mg \sin \varphi$ ,  $A = FL$ . Подставив соответствующие значения  $F$  и  $m$ , получим  $A = m g \sin \varphi L = \rho \omega L g \sin \varphi L$ . Длину участка  $L$  можно выразить как  $L = vt$ , где  $v$  – скорость течения воды, а  $t$  – время. Тогда  $A = \rho \omega v t g \sin \varphi L$ . Принимая во внимание, что  $\omega v = Q$ , а  $L \sin \varphi = H$ , и подставляя их, получаем  $A = \rho g QH t$ . Мощность потока, т.е. рабо-

та в единицу времени,  $N = A / t = \rho g Q H$ . Подставляя значения плотности воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$ , расхода воды на участке  $Q = 0,5 (Q_1 + Q_2) \text{ м}^3/\text{с}$  ( $Q_1$  и  $Q_2$  – расходы воды соответственно в начале и конце участка), а падение реки на участке  $H$  м, получаем  $N = 9810 \cdot Q H$  Вт, или  $N = 9,81 \cdot Q H$  кВт. Это строгий теоретический вывод расчетной формулы потенциальной мощности. В других работах (В.А. Бахтиаров, Я.Ф. Плешков) формула потенциальной мощности получена упрощенным способом. Принимая работу, совершаемую потоком, за  $\rho Q H$  и учитывая, что 1 кВт равен 102 кг м/с, получаем  $N = (1000 Q H) / 102 = 9,81 \cdot Q H$  кВт.

Потенциальные запасы гидроэнергии определяют, исходя из 8760 часов использования потенциальной мощности или по формуле  $\mathcal{E} = 9,81 \cdot Q H \cdot 8760 = 85\,900 \cdot Q H$  кВт·ч (8760 – число часов в году).

Определению потенциальных гидроэнергоресурсов каждой реки предшествует составление ее водноэнергетического кадастра, включающего в себя общее описание реки и бассейна, исходные данные по гидрометрии, гидрологии, топографии, инженерной геологии и пр. При этом строится кадастровый график, представляющий собой продольный профиль реки, графики нарастания значения площади водосбора в квадратных километрах и средних многолетних расходов воды в кубических метрах в секунду.

Для определения потенциальных гидроэнергоресурсов водотока все его протяжение делится на расчетные участки, границы которых намечаются с учетом уклонов реки, мест впадения крупных боковых притоков, а также в зависимости от наиболее выгодных створов по топографическим и геологическим условиям.

Затем по приведенным выше формулам производится подсчет потенциальной мощности на каждом участке путем перемножения коэффициента 9,81 на средний расход на участке и падение на участке (разность высотных отметок в начале и конце расчетного участка). Почастковую потенциальную энергию получают перемножением мощности на число часов в году.

Потенциальные запасы всей реки получают путем суммирования потенциальных запасов участков. Таким же способом находят потенциальные гидроэнергоресурсы отдельных бассейнов рек и регионов.

Таким образом, для исчисления потенциальных гидроэнергетических ресурсов необходимо иметь продольный профиль реки и

график нарастания расходов воды. Такая информация имеется в настоящее время только по большим и средним рекам, длиной более 100 км.

Кадастровый график для одной из сибирских рек с показанием схемы деления на расчетные участки, а также исчисление ее потенциальных гидроэнергетических ресурсов в удобной табличной форме дано в Практикуме [7].

Исчисление потенциальных гидроэнергетических ресурсов малых рек, длиной от 26 до 100 км, по которым в Государственном водном кадастре можно найти общее падение реки и расход воды в ее устье, производится по формуле, которая была предложена С.В. Григорьевым:

$$N = \alpha_m N_o,$$

где  $N_o = 9,81 Q_y \sum H$ . Здесь  $N_o$  – теоретическая мощность в устье реки при использовании расхода в устьевом створе ( $Q_y$ ) на полном падении реки ( $\sum H$ );  $\alpha_m$  – коэффициент теоретической мощности, равный отношению потенциальной мощности реки, вычисленной как сумма мощностей последовательных участков реки ( $N_p = 9,81 \sum(Q_i H_i)$ ) к предельной мощности, сосредоточенной в устье ( $N_o = 9,81 Q_y \sum H$ ). Коэффициенты теоретической мощности вычисляются по группировкам рек, среди которых есть реки, по которым можно произвести подсчет мощностей по участкам и предельной мощности в устье. По вычисленным переходным коэффициентам  $\alpha_m$  подсчитываются потенциальные мощности остальных малых рек данной группировки.

## **2.2. Теоретический, технический и экономический водно-энергетический потенциал рек Российской Федерации и его распределение по территории**

Последнее по времени исчисление этих ресурсов было закончено в 1960–1961 гг. институтом Гидроэнергопроект и несколько уточнено институтом Гидропроект в 1980 г. При этом подсчетом были охвачены в основном крупные и средние реки.

Полный водноэнергетический потенциал (теоретический или валовый) речного стока России составил 2800 млрд кВт·ч, в том числе крупных и средних рек – 2400 млрд кВт·ч и малых рек – 400 млрд кВт·ч или 14% от полного потенциала.

Распределение потенциальных водноэнергетических ресурсов крупных и средних рек по экономическим районам России дано в табл. 2.1. Из таблицы видно, что наиболее богаты водноэнергетическими ресурсами Восточно-Сибирский район (35% от полного) и Дальневосточный район (42%). Всего на Азиатской территории России сосредоточено 2085 млрд. кВт·ч энергетического потенциала, или 87%. На Европейской территории России потенциальные водноэнергетические ресурсы крупных и средних рек составляют 310 млрд кВт·ч, или всего 13%.

Помимо потенциальных гидроэнергоресурсов необходимо знать ту часть их, которая на современном уровне развития науки и техники может быть использована для получения электроэнергии путем создания гидроэлектростанций, так называемый *технический гидроэнергопотенциал*. Эта часть гидроэнергоресурсов может быть определена после учета всех потерь, как возникающих при превращении гидравлической энергии в электрическую, так и зависящих от природных условий и параметров установки (недоиспользование отдельных участков реки, наличие глубокой сработки водохранилища, недостаточная зарегулированность стока и т.п.). Кроме того, учету подлежат неизбежные отъемы воды на *неэнергетические* нужды (орошение, обязательные попуски по условиям нижнего бьефа). Соотношение между техническим и полным гидроэнергопотенциалом в целом по России составляет 0,69.

Наибольший интерес для хозяйства имеет экономический гидроэнергопотенциал – часть технического, использование которого экономически целесообразно в настоящее время с учетом требований топливно-энергетического баланса региона, комплексного использования водных ресурсов и охраны природной среды. Экономический гидроэнергопотенциал – величина переменная, зависящая от экономической конъюнктуры.

По оценке 1961 г., технический и экономический гидроэнергопотенциал всех рек России составил соответственно 1680 и 850 млрд кВт·ч. Наибольший экономический гидроэнергопотенциал сосредоточен в Сибири (400 млрд кВт·ч), на Дальнем Востоке (290 млрд кВт·ч) и на Северном Кавказе (25 млрд кВт·ч). Среднеголетняя выработка эксплуатируемых и строящихся гидроэлектростанций (на 1.01.2003) составила 192 млрд кВт·ч, или 22% экономического гидроэнергопотенциала России.

Распределение технического и экономического гидроэнергопотенциала, также его использование по территории России дано в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Распределение потенциальных, технически возможных к использованию и экономических водноэнергетических ресурсов России (в млрд кВт·ч) по экономическим районам (крупные и средние реки)

Экономический район	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Потенциальные водноэнергетические ресурсы	Удельная насыщенность, тыс. кВт·ч/км <sup>2</sup>	Технические водноэнергетические ресурсы	Экономические водноэнергетические ресурсы	Среднемировая выработка эксплуатируемых и строящихся гидроэлектростанций (на 1.01.2003)
Северо-Западный*	1677,9	99,0	59	55	43	12,8
Центральный	485,1	15,0	31	8,0	6,0	1,5
Волго-Вятский	263,3	15,0	57	9,0	7,0	5,6
Центрально-черноземный	167,7	2,2	13	0,8	-	-
Поволжский	536,4	71,0	104	47,0	41,0	30,7
Северо-Кавказский	355,1	108,0	300	53,0	25,0	8,0
Уральский	824	84,0	43	56,0	40,0	4,5
Западно-Сибирский	2427,2	144,0	146	93,0	46,0	8,71
Восточно-Сибирский	4122,8	848,0	206	664	350	113,5
Дальневосточный	6215,9	1009	161	684	294	20,44
Всего по России	17075,4	2395	140	1670	852	192
Из них:						
по Европейской территории России		310,0		173	122	
по Азиатской территории России		2085		1497	730	

\* Вместе с Северным районом и Калининградской областью

Из таблицы видно, что наибольший процент использования экономического потенциала наблюдается на Европейской территории России (40%), а наименьший (7%) -- на Дальнем Востоке.

В промышленно развитых странах эта величина колеблется от 40 до 50%.

Если валовый (теоретический) гидроэнергopotенциал не вызывает сомнений, то технический, по мнению специалистов Гидропроекта, представляется заниженным. Некоторые сомнения вызывает и подсчитанный ранее экономический гидроэнергopotенциал. Это связано в первую очередь с новым подходом к оценке последствий создания водохранилищ и решению природоохранных мероприятий. Поэтому многие ранее разработанные схемы использования водотоков должны быть пересмотрены с позиций минимума затоплений водохранилищами и сохранению окружающей среды. Естественно, это приведет к уменьшению степени зарегулированности стока и использования напора. Однако при этом надо находить такую схему разбивки водотока на ступени использования, при которой использование стока, в том числе и энергетическое, остается экономически оправданным. С учетом заданных критериев следует ожидать снижение экономического гидроэнергopotенциала в районах Центра, Юга, Северо-Запада Европейской части России, Западной Сибири и некоторых районов Дальнего Востока. Экономический гидроэнергopotенциал Кавказа, части районов Сибири может повыситься.

Первоочередным является сооружение ГЭС на Томи, Катунь, Алдане, притоках Амура, в бассейне Терека и Кубани. Предпочтение будет отдаваться строительству средних и малых ГЭС с небольшими водохранилищами речного типа, характеризующимися незначительными затоплениями сельскохозяйственных земель, лесов, населенных пунктов, инженерных коммуникаций.

Следует особо остановиться на малых ГЭС мощностью от 100 до 30 000 кВт.

Преимущества малых ГЭС перед средними и крупными сводятся к следующим:

- возможность энергоснабжения труднодоступных и отдаленных районов;
- низкая капиталоемкость;
- экологическая чистота. Этот вопрос спорный. По-видимому, скорее надо говорить о легкости согласования проектов малых ГЭС;
- носят рыночный характер. Основу развития малой энергетики составляют частные лица и отдельные предприятия.

Технический потенциал малых ГЭС России, по оценке Гидропроекта, составляет около 360 млрд кВт·ч. К настоящему времени

в России в эксплуатации сохранилось 22 малых ГЭС (МГЭС) суммарной мощностью 185 МВт из 6614 МГЭС, действовавших на начало 1952 г. По предварительной оценке, рекомендовано восстановить примерно 100 МГЭС (мощностью от 100 до 1500 кВт) суммарной мощностью около 85 МВт, в основном на Северном Кавказе, в Ленинградской, Псковской и Новгородской областях.

### **2.3. Нетрадиционные возобновляемые энергоресурсы и сложность их использования**

Известные негативные последствия сооружения гидроэлектростанций (затопление и подтопление земель, плохая подготовка ложа водохранилищ, неблагоприятные изменения ледотермических условий, снижение биологической продуктивности пойм и т.д.), отразившиеся на качестве природной среды на условиях жизни населения и развития отдельных отраслей хозяйства, повлияли в последние годы на формирование отрицательного отношения ряда специалистов и общественного экологического движения к строительству любых гидротехнических объектов на реках и к реализации конкретных проектов ГЭС.

В связи с новыми тенденциями в развитии экономики нашей страны, ее переориентацией на социальные нужды и решению экологических проблем развитию нетрадиционных источников энергии отводится существенная роль. В настоящее время использование возобновляемых источников энергии – геотермальных вод, приливных течений, энергии волн, ветра и солнца – рассматривается нередко в качестве альтернативных гидроэнергетике экологически «чистых» источников энергии.

Темпы и масштабы освоения указанных источников энергии в России отстают от зарубежных и не отвечают требованиям хозяйства, особенно в регионах, располагающих запасами этих видов энергоресурсов.

Запасы геотермальной теплоты в виде термальных вод в России относительно невелики и сосредоточены в основном на Камчатке. Там же с 1967 г. эксплуатируется Паужетская геотермальная электростанция мощностью 7 МВт.

Запасы термальных вод с температурой от 50 до 100°C обнаружены в Западной Сибири на глубине 1–3 км и более, в Восточной Сибири наиболее перспективным по использованию термальных

вод является Северное Прибайкалье. Термальные воды этих регионов предполагается использовать для обогрева населенных пунктов в бальнеологических целях, для создания парниковых хозяйств.

По экономическим показателям, использование энергии геотермальных источников обходится пока намного дороже электроэнергии от ГЭС. Так, себестоимость энергии, вырабатываемой Паужетской геотЭС, составляет 1,9 коп/(кВт·ч), а на ГЭС Ангаро-Енисейского каскада – в 30 раз меньше.

Запасы приливной энергии России оцениваются в 250 млрд кВт·ч в год. В использовании этого неисчерпаемого источника энергии делаются только первые шаги. Первая опытная Кислогубская ПЭС мощностью 400 кВт построена в 1967 г. на Кольском полуострове. Более мощные (до 25 млн кВт) проектируются в Мезенском заливе Белого моря, на побережье Охотского моря (мощностью 8 млн кВт) и в других районах.

У ПЭС своеобразный режим работы, для приспособления которого к режиму потребления требуется специальное устройство, в том числе аккумуляторы. Проектируются ПЭС далеко от потребителей и для доставки энергии нужны мощные и протяженные высоковольтные линии.

Гидроэнергетический потенциал морских волн пока не определен из-за отсутствия технологии преобразования этого вида энергии в электрическую.

Что касается солнечных электростанций (СЭС), то в настоящее время в Крыму работает гелиостанция мощностью 5 МВт, это самая экологически чистая электростанция. В пределах России пока имеются только утвержденные проекты СЭС.

Ветровых электростанций (ВЭС) в мире действует большое количество. У нас это тоже находится пока в стадии разработки и опытных установок. В настоящее время рассматривается возможность сооружения ВЭС на Ладожском озере для снабжения энергией о. Валаам.

Недостаток ВЭС – малая концентрация мощности и небольшое число часов использования в году.

Нетрадиционные источники энергии хотя и признаются экологически чистыми, но в большей или меньшей степени могут неблагоприятно воздействовать на различные природные среды и объек-

ты. Так, например, неблагоприятные воздействия СЭС на окружающую среду могут проявляться:

- в отчуждении земельных площадей, их возможной деградации;

- в большой материалоемкости;

- в изменении теплового баланса, влажности, направления ветра в районе расположения станции;

- в опасности перегрева и возгорания системы т.д.

В ветроэнергетике это проявляется:

- в шумовых воздействиях, радио и телевизионных помехах;

- в отчуждении земельных площадей;

- в опасности для мигрирующих птиц и насекомых и т.д.

В приливной энергетике:

- в периодическом затоплении прибрежных территорий, изменении землепользования в районе ПЭС, флоры и фауны акватории.

В заключение необходимо отметить сложность использования нетрадиционных энергоресурсов, которая заключается в невозможности экономически обосновать эффективность нетрадиционных энергоустановок из-за несовершенства методологии экономических расчетов и крайне высокой стоимости производства электроэнергии на мелких электроустановках, не освоенных ни в строительстве, ни в эксплуатации. Кроме того, ни в одной из стран с относительно развитой нетрадиционной энергетикой не ставится задача решения энергетической проблемы только с ее помощью. На долю последней в лучшем случае приходится единицы процентов потребляемой электроэнергии.

## **Раздел 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

### **Глава 3. ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ И СПОСОБЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

#### **3.1. Общие положения**

Проектируемое водохозяйственное сооружение рассчитывается на длительный срок эксплуатации в течение последующего после строительства периода. Поэтому для водохозяйственных расчетов необходимо использовать возможные для этого периода значения речного стока и его режимные характеристики. Например, при обосновании размеров водохранилищ с заданной водоотдачей необходимо учитывать характер возможного в будущем маловодья – его длительность и степень понижения стока. Размеры водопропускных сооружений в теле плотины также должны устанавливаться на основе расчета гидрографов возможных высоких половодий и паводков в течение будущего периода эксплуатации сооружений.

Таким образом, данные о речном стоке непосредственно используются для обоснования как размеров, так и режима эксплуатации водохозяйственных сооружений, обеспечивающих заданное водопотребление. При выполнении водохозяйственных расчетов возникает необходимость использования данных о факторах, влияющих на сток – метеорологических (осадки, испарение, температура воздуха и почвы и др.), ландшафте водосбора (рельефа, почвенного и геологического строения, растительности), морфометрических и гидравлических характеристиках речного русла и т.д.

#### **3.2. Состав гидрологических данных для водохозяйственного проектирования**

Гидрологическая информация, поступающая от опорной гидрологической сети комитетов по гидрометеорологии, составляет основу гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании. Кроме того, необходимо привлекать данные специальных наблюдений других министерств и ведомств. Качество расчетов зависит от наличия и точности гидрологических данных. Проекти-

рование любого водохозяйственного мероприятия начинается с анализа надежности и однородности данных имеющейся сети, с осуществления специальных гидрологических изысканий для сбора данных по проекту.

Данные наблюдений за стоком представляются в виде таблицы среднеинтервальных расходов воды (см. табл. 3.1).

Проектные водохозяйственные расчеты целесообразно выполнять в зависимости от решаемых задач и наличия исходной информации по декадным (в половодье или за период открытого русла) и месячным (в межень) интервалам времени. В этом случае в табл. 3.1 вводятся дополнительные графы. Проведение расчетов только по указанным интервалам времени дают удовлетворительные результаты лишь для ГЭС с водохранилищами годового и многолетнего регулирования стока. Применение суточных интервалов оправдано только для ГЭС с водохранилищами суточного регулирования стока и с низким коэффициентом его использования. Применение расчетных интервалов более месяца приводит к существенному завышению расчетной водо- или энергоотдачи, что является крайне нежелательным. При этом обычно используется не календарный год – с января по декабрь, а водохозяйственный – с начала половодья до конца межени. Практический смысл такого года заключается в том, что в его пределах замыкается определенный этап работы водохранилища.

Граница водохозяйственного года, как правило, совмещается с началом первого половодного месяца. Хотя от года к году время наступления половодья по календарю не совпадает, границу года следует жестко закреплять, ориентируя ее на более раннее начало половодья. Этим исключается неизбежное искажение стока предшествующей межени высокими расходами начавшегося раннего половодья, когда за начало года принимается среднее или позднее его наступление. В связи с разнообразием климатических условий используемые водохозяйственные годы имеют различные границы: с марта по февраль, с апреля по март, с мая по апрель и т.д.

Представленный стоковый ряд наблюдений за многолетний период можно рассматривать как статистическую выборку из генеральной совокупности, описывающей естественные процессы. Основными характеристиками, которые используются (среди прочих) при водохозяйственном проектировании, являются:

Среднемесячные и среднегодовые расходы воды рек  
в створе \_\_\_\_\_, м<sup>3</sup>/с

Водохозяй- ственный год	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	Средний годо- вой расход ВОДЫ
1912-13	145	1061	203	85	121	108	212	91	50	45	47	51	185
1913-14	431	1028	105	68	41	38	41	39	39	42	43	53	164
1914-15	222	728	94	97	266	130	193	111	68	60	56	55	173
.	.	.	.	.	.	-	.	-	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	-	.	-	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	-	.	-	.	.	.	.	.
Средний	200	1320	502	195	149	167	279	206	109	77	65	64	278
Наибольший	906	2302	1158	564	570	641	1047	726	213	163	149	97	424
Наименьший	36	553	94	67	41	38	41	39	39	42	43	36	164

- 1) средний многолетний годовой сток ( $\overline{Q}_T$ - или  $\overline{W}_T$ );
- 2) распределение стока в течение года (по сезонам, отдельным периодам, в течение месяца, суток);
- 3) максимальные расходы воды:
  - сформированные весенним снеготаянием (максимумы весеннего половодья);
  - сформированные ливневыми осадками (максимумы дождевых паводков);
  - сформированные в результате обоих факторов (весеннее снеготаяние и ливневые осадки);
  - различной обеспеченности;
- 4) объем стока весеннего половодья и дождевых паводков;
- 5) минимальные расходы;
- 6) среднегодовой расход взвешенных и донных наносов;
- 7) распределение расходов взвешенных и донных наносов в течение года;
- 8) продолжительность периодов с ледовыми явлениями, например периодов с ледяным покровом и ледохода.

Эти характеристики устанавливаются по многолетним рядам наблюдений. Для применения стандартных статистических методов данные необходимо проверять на стационарность и однородность известными методами математической статистики.

Методы моделирования могут быть полезными для получения гидрологических данных в следующих случаях: при наличии пропусков в рядах наблюдений; при коротком периоде наблюдений; при отсутствии данных для обследуемого участка, например вблизи плотин, но при наличии их на соседних участках.

Для этого разработано несколько математических методов и целый ряд программ расчета. Используемая при водохозяйственном проектировании календарная последовательность значений стока реки должна быть однородной, т.е. наблюдаемый сток должен быть приведен к естественному состоянию.

Если сток реки регулируется водохранилищами, то выполняются расчеты по его ретрансформации; если сток изымается на хозяйственные нужды, то выполняются расчеты по его восстановлению, т.е. приведению к естественному. При этом учитываются как безвозвратное водопотребление, так и размеры и режим поступле-

ния в реку возвратных вод. Аналогично восстанавливается естественный сток и в случае территориального перераспределения стока из одной системы в другую. Следует заметить, что естественный сток очень многих рек уже в настоящее время существенно нарушен и продолжает нарушаться в результате эксплуатации водохранилищ и значительных изъятий воды для целей водоснабжения и т.п., а восстановление его, т.е. приведение к естественным условиям, становится все сложнее. В восстановленные ряды вносятся дополнительные, иногда существенная, погрешность, и поэтому использование их нередко оказывается нецелесообразным. Поэтому в проектной практике часто ограничиваются короткими рядами наблюдений за стоком, не нарушенными хозяйственной деятельностью.

При проектировании *каскадов водохозяйственных установок* требования к исходным гидрологическим данным значительно возрастают. В этом случае появляется необходимость устанавливать боковой приток на участках между створами расположения гидроузлов.

Под *боковым притоком* на участке реки понимается суммарный сток воды всех постоянных и временных водотоков, непосредственно впадающих в русло с частного водосбора.

В зависимости от наличия исходных гидрометрических данных определение боковой приточности осуществляется следующими способами: по сумме расходов притоков, впадающих в пределах участка (при освещенности частного водосбора наблюдениями на притоках не менее 50%); по методу водного баланса; по разности расходов воды в замыкающем створе расчетного участка и во входном створе, предварительно трансформированных в русло на расчетном участке.

Усложняются гидрологические задачи при разработке схем совместной работы гидроэлектростанций в каскадах и на разных реках в составе энергосистем, а также и в связи с решением проблемы территориального перераспределения стока из одного бассейна в другой. В этих случаях, кроме прочих проблем, прежде всего, возникает необходимость в установлении зон синхронного и асинхронного колебаний стока на территории рассматриваемых бассейнов. Сложным является и гидрологическое обоснование гидроузлов с водохранилищами глубокого многолетнего регулирования. Здесь существенное значение приобретает вопрос о цикличности стока.

Анализ накопленных материалов исследований показывает, что колебания стока отдельных лет и сезонов в статистическом смысле не независимы от стока смежных лет и удаленных от них лет и сезонов. Иначе говоря, объемы стока оказываются связанными между собой. Математически эта связь оценивается коэффициентами корреляции на первом сдвиге  $r_1$ , значения которых в большинстве случаев положительны и существенно больше нуля.

Для начального цикла многовариантных водохозяйственных и водноэнергетических расчетов использование всего длительного наблюдаемого гидрологического ряда не всегда целесообразно.

В этом случае допустимы расчеты либо по отдельным характерным по водности годам, либо по расчетным периодам, включающим в себя последовательности из нескольких маловодных лет подряд, средние по водности и многоводные годы.

Расчетный период, т.е. отрезок полного гидрологического ряда, должен удовлетворять условиям репрезентативности и отвечать следующим требованиям: по общей водности он должен быть близким к среднему многолетнему значению (норме стока), но не больше; в состав его должны входить годы различной водности и характерные сочетания лет различной водности; коэффициент изменчивости годового стока за выбранный расчетный период должен быть близким (но не меньше) к коэффициенту изменчивости годового стока за весь имеющийся гидрологический ряд. Длительность расчетного ряда обычно принимается не менее 20 лет. Указанная длительность условна и требует конкретного обоснования в зависимости от характера колебаний стока и глубины его регулирования водохранилищем. Подбор характерных для водохозяйственных расчетов лет необходимо производить не только по признаку водности года. Обязательно для маловодного года следует вводить дополнительные критерии – *водность лимитирующего периода* и *водность лимитирующего сезона*. Подбор маловодного года должен осуществляться таким образом, чтобы его реальный гидрограф соответствовал расчетной обеспеченности как по общей водности, так и по водности лимитирующих периода и сезона. Для разных отраслей использования водных ресурсов лимитирующий период и сезон будут разными. Например, в отношении обеспечения водой промышленности и городов лимитирующим периодом будут межень и летний сезон, в отношении гидроэнергетики – межень и зимний сезон,

в отношении обеспечения водой сельского хозяйства – вегетационный период и т.п. Продолжительность лимитирующего периода зависит от степени намечаемого регулирования стока. При сезонном регулировании стока решающее значение имеет водность всей межени. При полном годичном регулировании стока межсезонное распределение стока не будет влиять на результат расчета, и модель маловодного года подбирается по обеспеченности годового стока, близкой к обеспеченности отдачи. В водохозяйственных расчетах режим естественного, не искаженного человеческой деятельностью, стока реки считается неизменным как на протяжении периода предшествующих гидрологических наблюдений, так и на протяжении периода будущей эксплуатации сооружений и водохранилищ. Вследствие этого хронологическая последовательность изменения естественного стока во времени рассматривается как прототип будущего режима. Правильность такого допущения подтверждается опытом эксплуатации многочисленных водохозяйственных установок, запроектированных и построенных на его основе. При этом, чем продолжительнее календарный ряд наблюдений за стоком реки, тем надежнее полученные на его основе параметры и проектные режимы работы водохранилища и гидроузла. По мере накопления данных наблюдений за стоком, например через каждые 10–12 лет, гидрологические, водохозяйственные, водноэнергетические расчеты следует проводить вновь и уточнять статистические параметры годового и сезонного стока, гарантированную водо- и энергоотдачу эксплуатируемых водохранилищ и гидроузлов. Возможное изменение статистических параметров годового и сезонного стока (среднее,  $C_V$ , ошибка  $C_V$ ,  $C_S/C_V$ ; здесь  $C_V$  и  $C_S$  – коэффициенты изменчивости и асимметрии соответственно) в зависимости от длительности ряда показано на примере р. Енисей в створе Саяно-Шушенской ГЭС. Общая длительность ряда среднегодовых расходов воды – 92 года. Статистические параметры, подсчитанные по нарастающей схеме через 10 лет (10, 20, 30 и т.д.), приведены в табл. 3.2. Ряд содержит три маловодных затяжных  $n$ -летки продолжительностью соответственно 19, 8, 19 лет, чередующихся с многоводными  $n$ -летками, длительностью 15, 10 и 16 лет.

Исходя из этого, полный период наблюдений можно считать вполне репрезентативным. На основании анализа данных, приведенных в таблице, можно сделать следующие выводы:

- среднелетние годовые расходы воды,  $C_V$ , ошибка  $C_V$  практически остаются неизменными с длительности ряда в 70 лет;
- значительная изменчивость  $C_S / C_V$  в зависимости от длительности ряда вызвана нестабильностью  $C_S$ .

Таблица 3.2

## Статистические параметры годового стока

Период	Длина ряда, лет	Среднее $Q_{г}$ , м <sup>3</sup> /с	$C_V$	Ошибка $C_V$ , %	$C_S/C_V$
1908-17	10	1430	0,172	22,4	2,35
1908-27	20	1450	0,139	15,9	3,50
1908-37	30	1470	0,143	13,0	0,18
1908-47	40	1470	0,144	11,3	0,37
1908-57	50	1460	0,143	10,1	1,80
1908-67	60	1480	0,147	9,2	2,20
1908-77	70	1480	0,146	8,5	1,65
1908-87	80	1480	0,143	8,0	1,38
1908-97	90	1490	0,142	7,5	0,72
1908-99	92	1480	0,143	7,4	0,93

Некоторая стабильность среднелетних годовых расходов воды,  $C_V$ , ошибок  $C_V$  при последовательном удлинении ряда можно объяснить и невысокими  $C_V$ .

Кроме параметров годового стока, следует уточнять и параметры максимального стока, особенно для гидроузлов, введенных в эксплуатацию в 60-е годы. Это связано с тем, что с 70-х годов на большинстве рек России наблюдается многоводный период.

Для примера в табл. 3.3 приведены статистические параметры максимального стока весенних половодий и дождевых паводков р. Вилюй в створе Вилюйской ГЭС-I, -II за периоды до ввода ГЭС в эксплуатацию и с учетом периода эксплуатации (до 2000 г. включительно).

Таблица 3.3

Статистические параметры максимального стока (среднее,  $C_V$ ,  $C_S / C_V$ ) р. Вилюй в створе Вилюйской ГЭС

Параметр	Весеннее половодье		Дождевой паводок	
	1926-1968 гг.	1926-2000 гг.	1926-1968 гг.	1926-1998 гг.
$\bar{Q}_{\max}$	6600	7640	2000	2000
$C_V$	0,31	0,33	0,67	0,70
$C_S / C_V$	2	3	3	3

Следует отметить, что в период после 1968 г. был превышен исторический максимум 1890 г., равный 14 000 м<sup>3</sup>/с. Максимальный расход весеннего половодья 1992 г. составил 16 200 м<sup>3</sup>/с.

Из таблицы видно, что наибольшему изменению с учетом последнего тридцатилетия подвергся среднегодовой максимальный расход весеннего половодья. Это в свою очередь вызовет изменение обеспеченных максимальных расходов воды и уточнение схемы их пропуска через гидроузлы. В настоящее время большая часть климатологов мира считает безусловным повышение температуры воздуха в результате «парникового эффекта». Это потепление, по некоторым оценкам, выразится в повышении среднегодовой температуры воздуха до 2 °С к 2020 г.

Однако и здесь нет однозначного восприятия изучаемой проблемы. По словам академика К.Я. Кондратьева, глобальное потепление происходит, но вовсе не является экологической угрозой первого порядка. Виновником парникового эффекта считается в первую очередь выброс  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Фактический прирост  $\text{CO}_2$  в атмосфере не так велик, как предсказываемый на основе вычислений (компьютерная версия). Почему? Биосфера, прежде всего леса, ассимилирует огромные количества  $\text{CO}_2$ , выбрасываемого в атмосферу, что гарантирует экологическую безопасность в будущем. Первичных лесов на планете осталось не так уж много и, если мы разрушим биосферу, выступающую резервуаром для углерода, мы действительно получим экологическую катастрофу.

Одним из наиболее существенных последствий возможного глобального потепления климата, обусловленного увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, может стать изменение водных ресурсов и гидрологического режима водных объектов и территорий. От направленности этих изменений во многом зависят условия водообеспечения населения, функционирования водоемких отраслей промышленности, гидроэнергетики, сельского хозяйства, а также экологическая ситуация обширных регионов.

Используемые гидрологические сценарии и возможные по ним изменения водного режима рек в результате потепления климата приведены в статье В.Ю. Георгиевского, И.А. Шикломанова и др. [29].

Учитывая возможные негативные последствия глобального потепления климата, следует более тщательно на базе длительных наблюдений за климатом и водным режимом отслеживать эти изменения и своевременно делать более обоснованные выводы.

### 3.3. Особенности гидрологического обоснования озерных водохранилищ

Если в водохранилище превращается озерный водоем путем создания подпора плотиной, сооружаемой в истоке реки, вытекающей из озера или на некотором расстоянии от него, то водохозяйственные расчеты необходимо проводить не по расходам стока из этого озера, а по расходам притока в него. Этим достигается исключение регулирующего влияния озера на сток реки в естественных условиях.

Расходы притока могут быть получены:

1) по сумме расходов впадающих в озеро притоков (с учетом стока с водосбора, не учтенного притоками). При этом получается приток брутто. Способ пояснений не требует;

2) по расходам стока реки в створе намечаемых подпорных сооружений с исключением расходов аккумуляции в озере в естественных условиях. При этом определяется приток в озеро за вычетом потерь на испарение с его водного зеркала.

Для подсчета расходов притока вторым способом, широко используемым в проектной практике, необходимо иметь следующие исходные данные: расходы стока из озера; данные наблюдений за уровнями озера, кривую зависимости площади водного зеркала озера от уровней. Если наблюдения велись на нескольких постах, то в расчетах следует использовать среднеарифметические данные из показаний всех постов.

Подсчет расходов притока в озеро ведется в табличной форме (табл. 3.4) путем реализации уравнения водного баланса озера за интервал времени:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ст}} \pm \Delta V / \Delta t,$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – расход притока;  $Q_{\text{ст}}$  – соответствующий расход стока из озера;  $\Delta V = \Delta Z F$  – объем положительной или отрицательной аккумуляции, т.е. объем воды, задержанной в озере или сработанной из него;  $\Delta Z$  – изменение уровня озера за расчетный интервал времени  $\Delta t$ ,  $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$  ( $Z_i$  и  $Z_{i+1}$  – уровни озера на начало и конец  $\Delta t$ );  $F_{\text{ср}}$  – площадь зеркала озера на уровне  $Z_{\text{ср}} = (Z_i + Z_{i+1}) / 2$ . В приведенной выше формуле знак плюс отвечает подъему уровня в озере, т.е. задержанию части притока, а знак «минус» – спаду уровня, т.е. сработке задержанного в период половодья части объема притока.

Таблица 3.4

## Подсчет расходов притока в водохранилище

Расчетный интервал времени $\Delta t$	$Q_{\text{ср}}, \text{ м}^3/\text{с}$	Z, м		$\Delta Z, \text{ м}$	$F_{\text{ср}}, \text{ км}^2$	$\Delta V \cdot 10^6, \text{ м}^3$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{пр}}, \text{ м}^3/\text{с}$
		на конец интервала	на середину интервала					
		1.06						
IV	857	1.19	1.12	0.13	1950	254	98	955
V	1970	1.77	1.48	0.58	2090	1215	462	2432
VI	1400	2.67	2.22	0.90	2350	2120	806	2206
...	...	...	...	...	...	...	...	...

В осенний период, когда испарение с водной поверхности озера достигает максимальных значений, величина притока в озеро (за вычетом этих потерь на испарение) может определяться со знаком «минус». Это показывает на формирование стока из озера в этот период только за счет сработки ранее накопленных в озере запасов воды.

#### 3.4. Методы проведения расчетов регулирования стока водохранилищами по гидрологическим рядам

Анализ существующих методов расчета регулирования стока позволяет разделить их на три основные группы в отношении использования ряда гидрологических наблюдений речного стока за прошедший период.

**1. Календарные методы.** Выполнение расчетов непосредственно по календарным естественным, не искаженным человеческой деятельностью, гидрологическим рядам с последующей статистической обработкой их результатов. Этот способ наиболее широко распространен в проектной практике. В нем предполагается, что используемые для расчета данные прошлых лет наблюдений отражают все сложные закономерности процесса стока в будущем. Достоинством его является наглядность, универсальность области применения, что весьма важно при разработке планов эксплуатации водохранилищ и компенсирующего регулирования отдачи в сложных водохозяйственных системах. Однако небольшая длина ряда наблюдений за стоком иногда приводит к значительным погрешностям при определении тех или иных водохозяйственных параметров.

**2. Вероятностные методы.** Проведение расчетов регулирования стока по статистическим параметрам кривых обеспеченности объемов годового стока ( $\bar{Q}_Г$  или  $\bar{W}_Г$ ,  $C_{vr}$ ,  $C_{sr}$ ,  $r_1$ , здесь  $C_{vr}$  и  $C_{sr}$  – коэффициенты изменчивости и асимметрии годового стока соответственно; а  $r_1$  – коэффициент автокорреляции, т.е. корреляции между смежными величинами годового стока), полученным путем предварительной обработки исходных рядов стока.

Вероятностные методы позволяют теоретически оценить вероятности различных чередований водности рек. В результате исключается возможная ошибка в оценке регулирующей способности водохранилищ при расчете по коротким гидрологическим рядам.

**3. Метод математического моделирования, или метод статистических испытаний (Монте-Карло).** Основная идея этого метода заключается в создании математической модели процесса речного стока. Метод имеет некоторое сходство с двумя вышеназванными методами в использовании гидрологических данных в выполняемых водохозяйственных расчетах. Общим с первым методом является то, что и здесь водохозяйственные расчеты производятся непосредственно по гидрологическому ряду, который, в отличие от наблюдаемого, создан путем моделирования процесса стока. Эта реализация достигается через установленные статистические параметры, т.е. функцию распределения вероятностей стока – в этом общее со вторым методом. Статистические испытания дополняют наблюдаемый ряд, который является одним из вариантов чередования маловодных и многоводных лет и сезонов, множеством других вариантов сочетаний лет различной водности, что имеет огромное значение для правильного решения задач многолетнего регулирования стока.

Принятие того или иного метода за основу обуславливается длительностью имеющегося гидрологического ряда и намечаемой степенью регулирования стока, определяющей продолжительность циклов сработки и наполнений водохранилища.

При сезонном регулировании стока, когда цикл работы водохранилища замыкается в пределах каждого года, обоснование параметров водохранилищ, построение диспетчерских правил управления режимом их работы и оценку гарантированных и средних многолетних значений отдач водохранилищ практически всегда с необходимой точностью можно выполнить непосредственно по ряду наблюдений, если его длина составляет не менее 25 – 30 лет (пер-

вый метод). В этих случаях статистические методы привлекаются лишь для получения экстремальных значений стока, не уловленных наблюдениями.

Достаточно сложным случаем является проектирование водохранилища многолетнего регулирования стока, при котором цикл его наполнения и сработки измеряется несколькими годами. Поэтому для расчетов многолетнего регулирования стока по календарному гидрологическому ряду необходимо, чтобы ряд был длительным и включал в себя группировку маловодных лет, дающих критическую сработку заданного объема водохранилища.

Так как в практике обычно приходится иметь дело с гидрологическими рядами ограниченной длительности, то за основу расчетов многолетнего регулирования принимается второй или третий метод, т.е. с использованием кривых распределения вероятностей стока или непосредственных гидрологических рядов, смоделированных по методу Монте-Карло.

Наблюденные гидрологические ряды в этом случае используются для получения характеристик режима регулирования и при разработке правил управления работой водохранилищ.

#### ***Вопросы для самопроверки***

1. Какие требования предъявляются к полноте и качеству исходных гидрологических материалов?
2. В чем смысл водохозяйственной разрезки года?
3. Как ведется подготовка исходных гидрологических данных при использовании естественного водосма (озера) под водохранилище?
4. Назовите способы использования данных гидрологических наблюдений в водохозяйственных расчетах. Их достоинства и недостатки.

### **Раздел 3. УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ**

#### **Глава 4. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ РОССИИ**

Организация системы управления водными ресурсами включает создание нормативно-правового обеспечения управления водными ресурсами. История разработки подобных документов насчитывает более четырех десятилетий, но ниже остановимся только на документах, действующих в настоящее время.

Как отмечалось выше, наиболее распространенным и эффективным средством управления водными ресурсами является регулирование стока водохранилищами. Правила управления (эксплуатации) водными ресурсами водохранилища прежде всего определяют объем попусков с учетом необходимых потребностей: гидроэнергетического и водохозяйственного комплекса, всех видов водоснабжения, сохранения водной и околородной экосистемы верхнего и нижнего бьефов, защиты населения и хозяйства нижнего бьефа и т.д. Министерство мелиорации и водного хозяйства СССР (Минводхоз СССР) 1987 г. утвердило межведомственный нормативный документ «Типовые правила эксплуатации водохранилищ емкостью 10 млн. м<sup>3</sup> и более» [47], в которых представлены вопросы использования водных ресурсов, хотя и несколько схематично. При этом на основе специальных исследований устанавливается размер и режим санитарных попусков (минимальных расходов воды в реке по условиям разбавления сточных вод). Санитарный попуск для непересыхающих рек и при обычных условиях водопользования принимается равным минимальному среднемесячному расходу воды вероятностью превышения 95%. Тем же ведомством и в том же году изданы «Методические указания о составе, содержании, порядке разработки, согласования, утверждения и уточнения схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов» [37]. В них впервые делается попытка установить размер природоохранного, в том числе и санитарного, попуска, обеспечивающего достаточное разбавление загрязнений, поступающих в реку со сточными, дренажными и ливневыми водами, и сохранить естественную жизнь реки. Кроме сохранения минимального расхода, природоохранный попуск должен обеспечить периодические промывки рек во время половодий и паводков.

Объем природоохранного попуска должен приниматься в размере 75% от объема половодья года 95%-й обеспеченности, а в остальной период – не ниже санитарного попуска.

Строительные нормы и правила: Определение основных расчетных гидрологических характеристик СП-33-101-2003. Издание официальное, Госстрой России. М., 2004; Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003. Госстрой России. М., 2004.

Этими документами устанавливается порядок определения расчетных гидрологических характеристик для обоснования основных параметров гидротехнических и гидроэнергетических объектов, включая и водохранилища, а также порядок пропуска высоких паводков и паводков через сооружения гидроузла.

В феврале 1999 г. был опубликован официальный текст «Водного кодекса Российской Федерации» [23]. Этим нормативным документом обозначены сферы государственного управления в области использования и охраны водных объектов. При этом, что очень важно, дается содержание схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, порядок их согласования, экспертизы и утверждения. Отдельной строкой выделено предназначение водохозяйственных балансов, разрабатываемых в составе «Схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов».

Основным документом, регламентирующим принципы и методы управления водными ресурсами, являются «Методические указания по составлению правил использования водных ресурсов водохранилищ гидроузлов электростанций» [39], в которых излагается теория и примеры разработки подобных правил, их согласование и утверждение.

«Санитарные правила проектирования, строительства и эксплуатации водохранилищ». СанПиН 39075-85. Издание официальное. Министерство здравоохранения СССР, Москва.–1987 г.

Этими правилами установлены требования к режиму работы и эксплуатации водохранилищ, а также перечень мероприятий по санитарной охране водных объектов в зоне влияния водохранилищ.

«Правила декларирования безопасности гидротехнических сооружений, находящихся в ведении, собственности или организаций топливно-энергетического комплекса Российской Федерации», утвержденная приказом Минтопэнерго России от 12 июля 1999 г.

№ 233 и согласованное с МЧС России (письмо от 8 июня 1999 г. № 33-1760-9), Москва, 1999 г.

Настоящие Правила разработаны в соответствии с Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» и «Положением о декларировании безопасности гидротехнических сооружений», утвержденным постановлением правительства Российской Федерации от 6 ноября 1998 г. № 1303.

Указанными правовыми актами определены цели и порядок декларирования безопасности гидротехнических сооружений, а также основные требования к содержанию декларации безопасности гидротехнических сооружений и осуществлению ее государственной экспертизы. В конце правил даны оглавление и примерное содержание глав и разделов декларации безопасности.

## Глава 5. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЙ БАЛАНС КАК ОСНОВА НЕОБХОДИМОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

### 5.1. Методика составления водохозяйственных балансов

Водохозяйственные балансы представляют собой расчетные материалы, сопоставляющие потребность в воде с имеющимися на данной территории водными ресурсами при определенном уровне развития хозяйства.

Баланс выясняет доступные к использованию водные ресурсы; подтверждает возможность удовлетворить ими намечаемое развитие хозяйства или указывает на исчерпание (дефицит) водных ресурсов; устанавливает принципиальный состав водохозяйственных мероприятий по покрытию (сведению) дефицитов воды при различных вариантах размещения водоемких потребителей: регулировании стока водохранилищами, привлечение вод из других бассейнов и др.; определяет в некоторых случаях свободный объем воды, оставшийся в реке для использования его за пределами рассматриваемой территории.

Водохозяйственный баланс состоит из приходной и расходной частей.

*Приходная часть баланса* включает следующие элементы:

- естественный поверхностный сток ( $Q_e$ );
- долю эксплуатационных расходов подземных вод, которая гидравлически не связана с поверхностными водами ( $Q_n$ );
- возвратные, дренажные, шахтные и сточные воды, поступающие в реку в пределах бассейна или его участка ( $Q_c$ );
- воды, перебрасываемые из других бассейнов ( $Q_{пер}$ );
- объемы сработки водохранилищ за расчетные интервалы времени ( $Q_{вдкр}$ ). Эти объемы включаются затем в расходную часть баланса в период наполнения водохранилища.

*Расходная часть баланса* обычно включает следующие элементы:

- воды, забираемые из реки выше створа на орошение, подпитку озер, а также на коммунально-бытовое и промышленное водоснабжение (за вычетом возвратного расхода, если водоотведение производится выше створа) ( $Q_{заб}$ );
- воды, перебрасываемые в другие бассейны ( $Q_{прб}$ );

- потери воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ и прудов ( $Q_{и}$ );
- потери речного стока, вызванные забором дренируемых подземных вод ( $Q_{подз}$ );
- расходы попусков воды ниже расчетного створа ( $Q_{поп}$ ). Попуски необходимы для нормальной работы водозаборов, поддержания санитарного состояния реки, обеспечения судоходства, а в некоторых случаях – обводнения пойм и нерестилищ.

Таким образом, уравнение водохозяйственного баланса в общем виде можно представить выражением:

$$Q_e + Q_n + Q_c + Q_{пер} \pm Q_{вдхр} - Q_{заб} - Q_{прб} - Q_{и} - Q_{подз} - Q_{поп} \leq 0$$

Большая часть расходной составляющей формируется специальными попусками (расходами) воды ниже створа разработки баланса. Значения этих расходов воды устанавливаются в соответствии с выявленными требованиями различных водопользователей к водным ресурсам реки ниже расчетного створа.

В настоящее время достаточно четкие требования к расходам попусков установлены только для судоходства и сельского хозяйства. В то же время каких-либо однозначных приемов установления экологических (природоохранных) попусков пока нет. Следует отметить, что при составлении балансов нет единого подхода к статьям приходной и расходной его частей. Здесь необходимо учесть все объемы забора воды выше рассматриваемого створа, а также объемы необходимых попусков ниже створа.

Расчет водохозяйственных балансов производится в удобной табличной форме в условиях стока разной водности, как правило, обеспеченностью (по стоку) 50, 75, 90 и 95%.

Колебания стока внутри года и сезонная неравномерность водопользования обуславливает необходимость составления балансов по интервалам времени, в пределах которых этими изменениями можно пренебречь. Как правило, можно ограничиваться декадными интервалами в период половодья и месячными – в период межени.

Для сохранения в расчетах реальных соотношений водности в различных частях бассейна рекомендуется составлять балансы для годового и сезонного стока в замыкающем створе и в устьях крупных притоков. Баланс составляется для конкретных лет, близких по

водности к году расчетной обеспеченности. При таком подходе, позволяющем автоматически учесть распределение стока между реками и участками рек бассейна, может оказаться необходимым предварительно рассмотреть 5 – 8 характерных по водности лет с различным внутригодовым и внутрибассейновым распределением стока и выбрать наиболее неблагоприятные (с наибольшими дефицитами воды).

Чтобы не допустить занижения доступных к использованию водных ресурсов, сток рек за характерные годы, принятые в качестве расчетных, следует приводить к естественным условиям, увеличивая его на объем безвозвратного водопотребления выше рассматриваемого створа, имевшего место в этот год.

Водохозяйственные балансы составляются чаще всего для условий водохозяйственного года (с начала половодья до конца зимней межени) в млн. м<sup>3</sup>.

В качестве примера в табл. 5.1 составлен водохозяйственный баланс реки Оби в створе Новосибирской ГЭС в условиях маловодного года.

По итогам водохозяйственных балансов для некоторого расчетного уровня можно выделить следующие случаи.

1. Положительный баланс, когда для всех расчетных интервалов времени объем приходной части баланса больше расходной части и дополнительных водохозяйственных мероприятий на данном расчетном уровне не требуется. При этом складывающийся избыток водных ресурсов в регионе позволяет осваивать новые виды водопользования, не ущемляя существующие.

2. Увязанный баланс, при котором наблюдается динамическое равновесие между приходной и расходной частями баланса. В этом случае для развития водозабора необходимо проведение специальных водохозяйственных мероприятий по изысканию дополнительных водных ресурсов внутри региона или осуществление переброски вод извне.

3. Отрицательный баланс, когда наличные водные ресурсы региона недостаточны для удовлетворения потребности в воде с необходимой степенью обеспеченности, включая требования к расходам воды ниже створа разработки баланса. В этом случае необходимы следующие мероприятия:

Таблица 5.1

**Водохозяйственный баланс р. Обь в створе Новосибирской ГЭС  
в условиях маловодного года обеспеченностью 95% на уровень 2000 г., млн. м<sup>3</sup>**

Элементы баланса	Год												
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
<b>Приходная часть</b>													
1. Естественный сток	5628	10099	5286	3498	3787	2225	1762	1199	670	673	623	573	36023
2. Добавка за счет регулирования стока водохранилищами	-238	-415	-1017	-502	42	34	171	466	515	620	670	552	898
<b>Итого:</b>	<b>5390</b>	<b>9684</b>	<b>4262</b>	<b>2994</b>	<b>3829</b>	<b>2259</b>	<b>1933</b>	<b>1665</b>	<b>1185</b>	<b>1293</b>	<b>1293</b>	<b>1125</b>	<b>36921</b>
<b>Расходная часть</b>													
1. Безвозвратные заборы воды промышленностью и коммунальным хозяйством	170	170	170	170	170	170	163	163	163	163	163	165	2000
2. Потери на испарение	8	79	79	79	79	79	79	0	5	16	24	26	545
3. Отбор стока на орошение и подпитку озер	84	429	518	357	279	271	179	-	-	-	-	-	2180
4. Минимальные допустимые объемы попусков	2814	3419	3419	3419	3419	3419	2814	3235	1499	1499	1499	1499	31954
<b>Итого:</b>	<b>3068</b>	<b>4160</b>	<b>4186</b>	<b>4025</b>	<b>3947</b>	<b>3939</b>	<b>3235</b>	<b>3398</b>	<b>1667</b>	<b>1678</b>	<b>1686</b>	<b>1690</b>	<b>39679</b>
<b>Избыток (+), дефицит (-)</b>	<b>+2322</b>	<b>+5524</b>	<b>+83</b>	<b>-1031</b>	<b>-118</b>	<b>1680</b>	<b>1302</b>	<b>1733</b>	<b>-482</b>	<b>-385</b>	<b>-393</b>	<b>-565</b>	<b>+242</b>
Сезонный дефицит стока	7687												

– при дефиците воды в отдельные расчетные интервалы времени и отсутствии его в годовом балансе маловодного года возникает необходимость проведения сезонного регулирования стока водохранилищем, т.е. перераспределения стока из многоводного сезона (половодье) на межень. При этом, как в нашем примере, полезный объем водохранилища численно равен объему сезонного дефицита стока;

– отсутствие дефицита стока лишь в балансе среднего по водности года ведет к необходимости проведения многолетнего регулирования стока или привлечения дополнительных источников воды;

– дефицит в балансе среднего по водности года может быть устранен только путем привлечения в рассматриваемый бассейн вод извне.

Для ликвидации выявленных дефицитов стока намечают водохозяйственные мероприятия (регулирование стока, подача его из смежных бассейнов), достаточность которых проверяют повторным водобалансовым расчетом. На основании отрицательного водохозяйственного баланса может быть сделан вывод о необходимости ограничения роста водопотребления, т.е. об отказе от развития в бассейне той или иной водоемкой отрасли.

В настоящее время практически все бассейны южной зоны России характеризуются напряженным или отрицательным водохозяйственным балансом (Волга, Урал, Дон, Кубань и др.).

Сведение водохозяйственных балансов бассейнов южной зоны в обозримой и особенно отдаленной перспективах возможно за счет форсирования следующих основных мероприятий:

– экономного использования водных ресурсов и научнообоснованного снижения норм водопотребления;

– строительства гидроузлов с крупными водохранилищами, регулирующими речной сток в соответствии с заданным режимом водопотребления;

– более интенсивного вовлечения в хозяйственное использование подземных вод;

– привлечения сюда части стока из районов, богатых водными ресурсами.

## **5.2. Современная методология установления экологических (природоохранных) попусков**

В современных условиях, исходя из охраны природы, необходимо в реках резервировать остаточный экологический сток. Вели-

чина остаточного экологического стока зависит от типа реки, водной и околоводной флоры и фауны. Чем выше экологический сток, особенно в период половодья, тем ниже регулирующая возможность создаваемых и эксплуатируемых водохранилищ ГЭС. Поэтому одним из основных вопросов рационального регулирования стока водохранилищ ГЭС и оптимального распределения водных ресурсов между участниками энергovoдoхoзяйствeннoгo кoмплeкca (ЭВХК) является вопрос установления экологических (природоохранных) попусков в нижние бьефы гидроузлов, особенно в половодный период.

Основное назначение водохранилищ – перераспределение стока реки из половодья на межень с учетом требования водопользования. При этом зарегулированные расходы в период зимней межени в несколько раз превышают естественные расходы воды, так как в этот период происходит сработка полезного объема водохранилища. В период летней межени наблюдается также превышение зарегулированных расходов воды над естественными, так как в этот период на большинстве крупных водохранилищ производятся навигационные и водохозяйственные попуски, а гидроузлы с водохранилищами неглубокого регулирования стока работают на приточных расходах воды. Делаем вывод: на зарегулированных реках расходы воды в период летне-осенней и зимней межени значительно превышают нормативные экологические (в том числе санитарные) расходы. Поэтому в настоящее время так остро стоит вопрос установления экологического стока в период половодья, единственного источника подземного стока реки, т.е. влагозарядки реки в межень.

В соответствии с рекомендациями Минводхоза [37] объем экологического стока ниже створов гидроузлов рекомендовано принимать:

- в половодье в размере 75% объема половодья года 95%-й обеспеченности в течение половодного периода;
- в остальные месяцы экологический сток должен быть не ниже минимального среднемесячного расхода года той же обеспеченности.

Такое нормирование некорректно, поскольку не учитывает внутригодовое распределение стока, что может вызвать разницу в объемах экологического стока, особенно в период половодья.

Аналізу установления экологического стока посвящены публикации многих авторов: А.Б. Авакяна, А.Е. Асарина, А.М. Влади-

мирова, В.Г. Дубининой, Д.Я. Ратковича, А.М. Черняева, И.С. Шахова, Б.Е. Фашевского и др.

Учитывая, что экосистема водного потока складывается в период половодья и межени, правильнее следует говорить о не нарушаемом экологически безопасном гидрографе как неприкосновенной части каждого водного объекта. Он должен быть динамичным и изменяться в зависимости от водности года.

Каких-либо научнообоснованных методов и критериев установления подобных экологических гидрографов нет. Есть только предложения. Например, Б.Е. Фашевский для практического расчета остаточного экологического стока рекомендует следующую схему:

- нижний предел экологического стока оценивается гидрографом естественного стока 99%-й обеспеченности;

- верхний предел экологического стока для средних и крупных рек оценивается гидрографами 50%-й обеспеченности, т.е. в годы, когда наблюдается максимум воспроизводства живой природы (луга, рыба и др.);

- учитывая примерно равную ущербность экосистемы в очень маловодные годы 99%-й и 95%-й обеспеченности, величина остаточного экологического стока в год 95%-й обеспеченности принимается равной естественному стоку, оцениваемому гидрографом 99%-й обеспеченности;

- величина естественного годового стока 50% обеспеченности принимается равной остаточному экологическому стоку в год 25% обеспеченности;

- по двум точкам проводится логнормальная кривая, позволяющая получить весь диапазон расчетных значений экологического стока, а именно:

- в год 25% обеспеченности экологический гидрограф стока приравнивается к естественному обеспеченностью 50%;

- в год 50% обеспеченности экологический сток приравнивается к естественному гидрографу обеспеченностью 75%, а в год 75% обеспеченности – соответственно 95% обеспеченности;

- в год 95% обеспеченности экологический сток описывается гидрографом естественного стока 99% обеспеченности.

Установлению дифференцированных по водности гидрографов экологических попусков придерживается и В.Г. Дубинина [32]. Ее

предложения включены в новые «Правила использования водных ресурсов Цимлянского водохранилища на р. Дон».

Из-за ненадежности гидрологических прогнозов предлагаемый Б.Е. Фашевским дифференцированный по водности режим экологических попусков в современных условиях пока маловероятен.

Сложности возникают и в выборе модели обеспеченных лет, так как из-за внутригодовой изменчивости стока объем экологических попусков в период половодья может измениться.

Возможные величины этих изменений показаны в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Экологические попуски в половодье года 95% обеспеченности			
Река и гидроузел	Модель года 95%-й обеспеченности	Объем экологических попусков в половодье, км <sup>3</sup>	
		0,75 $W_{\text{половодья}}$	объем половодья года 99%-й обеспеченности
Енисей – Саяно-Шушенский	1910	14,7	19,5
	1945	12,5	15,8
Аварское Койсу – Ирганайский	1957	1,23	1,45
	1961	1,07	1,26

*Примечание.* Период половодья для Енисея принят с мая по июль, для Аварского Койсу – с мая по август.

Из таблицы видно, что расхождение в объемах попусков в зависимости от модели внутригодового распределения стока может достигать 20%.

Несколько неожиданны предложения А.П. Носаль и А.М. Черняева по нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты, которые, в частности, сводятся к следующему:

– экологические расходы в период весеннего половодья принимаются на зарегулированных участках рек равными среднему сбросному расходу за период пропуска весеннего половодья для года 50%-й обеспеченности.

Чтобы пояснить суть этого предложения, приведу пример по Саяно-Шушенскому и Ирганайскому гидроузлам: в створе Саяно-Шушенского гидроузла объем зарегулированного стока в период половодья года, близкого к 50%-й обеспеченности (1930 г.), составил 16,6 км<sup>3</sup>, а в створе Ирганайского гидроузла – 1,6 км<sup>3</sup>. Сравни-

вая их с данными табл. 5.2, видно, что они близки к объему половодья года 99%-й обеспеченности.

Принятие того или иного варианта формирования экологически безопасного гидрографа попусков осложняется отсутствием в настоящее время методологии и жестко нормированных требований окружающей среды к режиму водных объектов, критериев допустимости того или иного воздействия на природные комплексы, а также методов научнообоснованной экономической оценки ущерба от недодачи воды отдельным участникам энергосистемных комплексов.

### **5.3. Оценка воздействия экологических попусков из водохранилищ на водо- и энергоотдачу комплексных гидроузлов**

Режим работы водохранилищ гидроэнергетических установок, особенно в половодный период, определяется объемом экологических попусков. Рекомендации по их установлению подробно изложены в предыдущем параграфе. К сожалению, все предлагаемые варианты установления экологических попусков носят формальный характер и не имеют эколого-экономического обоснования. Как первый шаг на пути их обоснования, проведено исследование по оценке воздействия экологических попусков на энергоотдачу комплексных гидроузлов, расположенных в различных регионах России.

Следует отметить, что снижение гарантированной водо- и энергоотдачи (минимальной отдачи расчетной обеспеченности) за счет увеличения объема экологического попуска, против проекта, в период половодья не может служить в качестве природоохранного критерия. Это, скорее, хозяйственный показатель. Автор стремился при этом не давать обоснования режима экологических попусков, а только показать величину ущерба на действующих энергосистемных комплексах при принятии того или иного варианта экологического попуска.

Изучению были подвергнуты три гидроузла: Ирганайский гидроузел, расположенный на р. Аварское Койсу (Дагестан), Вилюйский гидроузел, расположенный на р. Вилюй (Якутия) и Саяно-Шушенский, расположенный на р. Енисей.

Ирганайский гидроузел имеет чисто энергетическое назначение, требования неэнергетических водопользователей (водоснабже-

ние, водный транспорт, рыбное и сельское хозяйство) ничтожно малы. Обеспечение этих водопользователей – задача всего каскада водохранилищ, в состав которого, кроме Ирганайского гидроузла, входят Чиркейский, Миатлинский и Чирюртские гидроузлы.

Основное назначение Вилюйского гидроузла также в основном энергетическое. Неэнергетические водопользователи: водоснабжение и водный транспорт. Требования экспедиционного судоходства сводятся к обеспечению нормируемых судоходных глубин в течение первых 4-х декад навигации (июнь и 1-я декада июля).

Назначение Саяно-Шушенского гидроузла – выработка электроэнергии и обеспечение водного транспорта и других водопользователей. Требования водного транспорта сводятся к обеспечению судоходных попусков в течение всего периода навигации.

Основные параметры гидроузлов даны в табл. 5.3.

В проекте навигационные попуски были приняты равными 1100 м<sup>3</sup>/с в период с мая по октябрь включительно. Полезный объем водохранилища при этом позволял осуществлять годичное регулирование стока. В настоящее время навигационные попуски установлены 1800 м<sup>3</sup>/с (V–VI) и 1200 м<sup>3</sup>/с (VII–X). Из-за увеличения попусков в весенне-летний период тот же полезный объем водохранилища позволяет производить неглубокое многолетнее регулирование стока. Уровень ежегодной сработки повышается с 500 до 511,4 м.

Таблица 5.3

Основные параметры гидроузлов  
1 – Ирганайский, 2 – Вилюйский, 3 – Саяно-Шушенский

Параметры	Ед. изм.	Гидроузел		
		1	2	3
Площадь водосбора	км <sup>2</sup>	7320	141 200	180 000
Контролируемый расход воды	м <sup>3</sup> /с	103	632	1480
Параметры водохранилища:				
– площадь водного зеркала	км <sup>2</sup>	18,0	2360	621
– полный объем	млн. м <sup>3</sup>	705	40 410	31 330
– полезный объем	млн. м <sup>3</sup>	397	22 360	15 340
Вид регулирования стока		годинное	многолетнее	многолетнее
Коэффициент регулирования стока		0,50	0,85	0,80
Коэффициент использования стока		0,997	0,93	0,96
Максимальный напор	м	198,7	70	221,0
Энергетические показатели:				
– установленная мощность	МВт	800	648	6400
– среднееголетняя годовая выработка энергии	млн. кВт·ч	1300	2500	23 200

Было рассмотрено два варианта экологических попусков, а именно:

1. Нормируемые попуски (в половодье как 0,75 от объема весеннего половодья года обеспеченностью 95%-й, в остальные месяцы – соответствующие минимальному среднемесячному расходу года 95% обеспеченности).

Таблица 5.4

Результаты расчетов регулирования стока			
Характеристика	Вариант попуска		
	проект	1	2
<b>Ирганайский гидроузел на р. Аварское Койсу</b>			
Половодье (май – август):			
– приток, млн. м <sup>3</sup>	1700	1700	1700
– зарегулированный сток, млн. м <sup>3</sup>	1289	1275	1446
– максимальный уровень водохранилища, м	547	547	539,6
Гарантированная мощность (ср. за межень), МВт	75,4	75,4	62,0
Снижение гарантии по отношению к проекту			
МВт		0	13,4
%			18
Годовая выработка энергии, млн. кВт·ч	1023	1023	996
<b>Вилуйский гидроузел на р. Вилуй</b>			
Половодье (май – июнь):			
– приток, км <sup>3</sup>	12,4	12,4	12,4
– зарегулированный сток, км <sup>3</sup>	3,42	6,71	7,87
– максимальный уровень водохранилища, м	246,0	244,4	244,1
Гарантированная мощность (средняя за маловодный период), МВт	301	229	194
Снижение гарантии по отношению к проекту			
МВт		72	107
%		24	36
Годовая выработка энергии, млн. кВт·ч	2273	2273	2263
<b>Саяно-Шушенский гидроузел на р. Енисей</b>			
Половодье (май – июль):			
– приток, млн. м <sup>3</sup>	16,3	16,3	16,3
– зарегулированный сток, км <sup>3</sup>	12,6	13,3	14,6
– максимальный уровень водохранилища, м	528,3	526,9	520,02
Гарантированный расход (средний за межень), м <sup>3</sup> /с	667	624	429
Снижение гарантии по отношению к проекту			
м <sup>3</sup> /с		43	238
%		6	36

2. Рекомендованные Б.В. Фащевским дифференцированные в зависимости от водности года попуски, а именно в год 50%-й обеспеченности расходы соответствуют естественному гидрографу 75%-ной обеспеченности, в год 75% и 95%-й обеспеченности соответственно гидрографам 95 и 99%-й обеспеченности.

Для исследования степени воздействия вариантно установленных экологических попусков на энергоотдачу комплексных гидроузлов проведены расчеты регулирования стока по средневодным и маловодным годам обеспеченностью (по стоку) 95%, а для Вилюйского гидроузла – по соответствующим периодам. В табл. 5.4 даны результаты расчетов.

Анализ результатов расчетов по приведенной таблице показал, что в период половодья объем экологических попусков превышает фактический по проекту. Если в варианте 1 это превышение (почти вдвое) наблюдается только на Вилюйском гидроузле с водохранилищем глубокого многолетнего регулирования стока, то в варианте 2 (по Б.В. Фащевскому) объем стока в половодье увеличивается по отношению к проектному до 12%, 16% и в 2,3 раза соответственно на Ирганайском, Саяно-Шушенском и Вилюйском гидроузлах.

Повышение попусков весной (против проектных) вызывает уменьшение зимних расходов воды и сокращение энергоотдачи ГЭС в самые напряженные по топливно-энергетическому балансу месяцы. Особенно значительное снижение зимней гарантированной отдачи наблюдается в варианте 2: до 18% – на Ирганайском, до 36% – на Вилюйском и Саяно-Шушенском гидроузлах. Это говорит о том, что принятие попусков по варианту 2 противоречит самой сути регулирования стока. Годовая выработка энергии во всех вариантах попусков практически не меняется.

По мнению некоторых ученых, например А.Е. Асарина, предпочтительнее в плане сохранения экосистемы речных пойм является пропуск транзитом первой или раз в два-три года первой и второй декадной волны, обеспечивающей затопление поймы, но это можно рассматривать лишь в качестве частного случая.

Если, например, на пойме находятся нерестилища, то для созревания икры и миграции мальков продолжительность ее затопления должна быть не менее 20 – 25 дней, а глубина затопления – до 1,5 м.

Это предложение рассмотрено на примере Новосибирской ГЭС на р. Оби, в нижнем бьефе которой в районе поймы у г. Колпашево находятся нерестилища.

Наиболее ответственный период в жизни рыб – нерест и нагул – в пределах Томской области протекает в течение мая. В связи с этим установлен и действует весенний запрет на всякое рыболовство в южных районах области с 25 апреля по 25 мая и в северных с 1 по 30 мая.

От гидрологического режима в этот период полностью зависит результат воспроизводства молоди рыб. Именно в это ответственное для рыбного хозяйства время осуществляется наполнение полезного объема водохранилища и на указанный объем воды 4,5–5,0 км<sup>3</sup> сокращается майский сток.

Для рыбного хозяйства важнее первая половина мая, к этому времени обычно задерживается и основное количество воды. Изъятое количество воды даже для района г. Колпашево, где в течение мая в зависимости от водности года проходит от 20 до 37 км<sup>3</sup> воды, довольно существенно и составляет от 11 до 23%, с которыми приходится считаться.

В связи с этим необходимо определить влияние режима наполнения водохранилища на уровень, степень залития, продолжительность затопления поймы р. Оби в Томской области в течение мая в характерные по водности годы.

Минимум продолжительности нахождения нерестовых участков под водой при оптимальных температурах для щуки – 17 суток, для карповых, кроме карася, – 20 суток.

Таким образом, для решения вопроса о влиянии зарегулирования р. Оби на воспроизводство рыбных запасов средней Оби следует определить уровни, стоявшие не менее 20 суток в период до и после зарегулирования стока реки. Зная, на сколько снизились максимальные уровни половодья продолжительностью стояния не менее 20 суток, можно определить, в какой степени изменились возможности воспроизводства, так как только эти уровни обеспечивают выход молоди.

Гидрологические условия на средней Оби таковы, что гидрограф весеннего половодья обычно имеет две вершины. Первый максимум наблюдается в первых числах мая. Этот максимум наиболее важен для условий нереста рыбы. В то же время при зарегулированном стоке он идет на наполнение водохранилища. Второй мак-

симум проходит обычно во второй половине мая – начале июня. Он менее важен для условий размножения рыбы, так как обычно к этому времени нерест почти всех видов рыб завершен. Для наполнения водохранилища хватает первой волны половодья, а вторая обычно сбрасывается из водохранилища.

При снятии максимальных уровней половодья, стоявших не менее 20 суток, ставилась задача получить уровень, наиболее влияющий на условия нереста и развития личинок. Поэтому при анализе гидрографа половодья учитывалась температура воды. Для снятия уровня применялись следующие правила: выбирался максимальный уровень, стоявший непрерывно в течение 20 суток; за дату начала стояния указанного уровня принималась дата, при которой температура воды в створе р. Обь – Колпашево находилась около 4–5 °С (температура, при которой начинается нерест у большинства видов рыбы).

С целью получения конкретных данных о потерях для рыбного хозяйства Томской области был выполнен расчет по следующей методике. За период до создания Новосибирского водохранилища были выбраны три маловодных года: 1945, 1951 и 1956. Для этих лет было выполнено регулирование стока Новосибирским водохранилищем по трем вариантам.

Первый вариант – энергетический. Максимально быстрое заполнение водохранилища с началом весеннего половодья. Такой вариант регулирования наиболее выгоден с точки зрения выработки электроэнергии.

Второй вариант – полурыбохозяйственный. Представляет собой компромисс между задачами энергетики и рыбного хозяйства. Первые 10 дней сток половодья пропускается транзитом, а затем наполняется водохранилище.

Третий вариант – рыбохозяйственный. Первые 20 дней сток половодья пропускается транзитом, а затем наполняется водохранилище.

Используя метод Калинина-Милюкова, получаем гидрографы стока у г. Колпашево по всем вариантам регулирования для 1945, 1951 и 1956 гг. Для примера гидрограф стока 1945 г. дан на рис. 5.1.

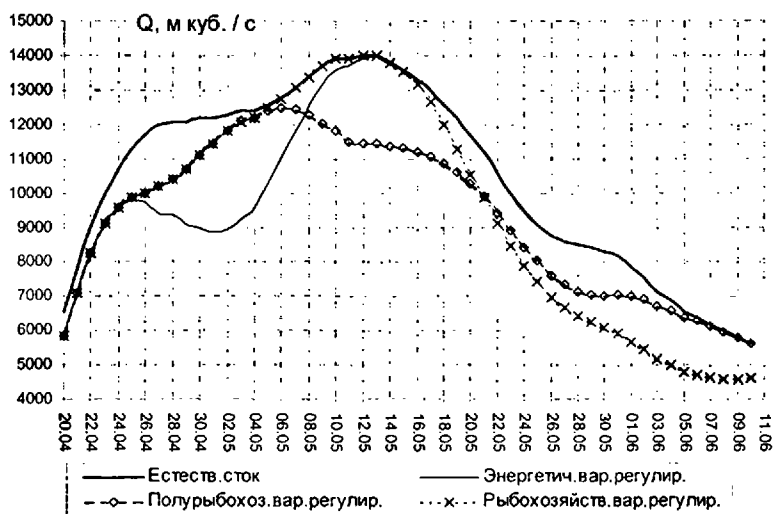


Рис. 5.1. Гидрограф естественного стока в Колпашево и три варианта регулирования стока для 1945 года

Используя полученные гидрографы стока, можно снять максимальный расход, стоявший не менее 20 суток, для каждого варианта регулирования. По кривой  $Q = f(H)$  снимаются аналогичные значения уровней воды. Затем с графика связи максимальных уровней, стоявших не менее 20 суток, с выловом рыбы можно снять значение вылова рыбы. Разность вылова рыбы, снятая для трех способов регулирования и для естественного стока, показывает величину потерь в выловах рыбы.

Согласно описанной выше методике были определены потери в выловах рыбы для 1945, 1951 и 1956 гг. Для 1945 г. выполнен расчет потерь выработки энергии ГЭС за период с апреля по июнь, который составил 13 и 28% соответственно для полурыбхоз. и рыбхоз. вариантов попусков.

Расчеты показали, что в первом варианте регулирования вылов рыбы снижается на 16–20%, во втором — на 8–10%, а в третьем — остается на уровне естественного.

В то же время выработка энергии ГЭС в период (IV–VI) снижается до 10% — во втором и до 25% — в третьем вариантах.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о снижении рыбопродуктивности поймы р. Оби в районе Колпашево под воздействием количественного изменения вод р. Оби за счет срезки половодной волны Новосибирским водохранилищем. Однако при этом снижение рыбопродуктивности возможно и в результате ухудшения качества воды.

***Вопросы для самопроверки***

1. Каково назначение водохозяйственных балансов?
2. Назовите основные статьи приходной и расходной частей баланса.
3. В чем состоят трудности определения экологических (природоохранных) попусков?
4. Какие Вы знаете рекомендации по установлению экологических попусков и в чем их недостатки?
5. Как влияют экологические попуски на режим водо- и энергоотдачи комплексных гидроузлов?

## Глава 6. ВОДОХРАНИЛИЩА И ИХ ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ

### 6.1. Основные предпосылки создания водохранилищ

Водные ресурсы используются многопланово – для хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных мест и промышленных предприятий, орошения, выработки электроэнергии, судоходства, рыбоводства, осушения, обводнения, рекреации и др. При этом отдельные задачи по водообеспечению различных отраслей водой решаются не изолированно, а с учетом интересов каждой отрасли и требований экологии.

Масштабы и характер развития водного хозяйства определяются в конечном счете теми требованиями, которые предъявляют к водному хозяйству обслуживаемые им отрасли. В первую очередь необходимо удовлетворить переменный во времени режим потребления воды. Внутригодовые изменения водопользования связаны с сезонным характером колебаний климатических условий, определяющих сезонность работы некоторых предприятий и даже целых отраслей, например сельского хозяйства. Динамика потребления воды в течение года имеет различный характер для разных отраслей и может быть проиллюстрирована схемой, представленной на рис. 6.1.

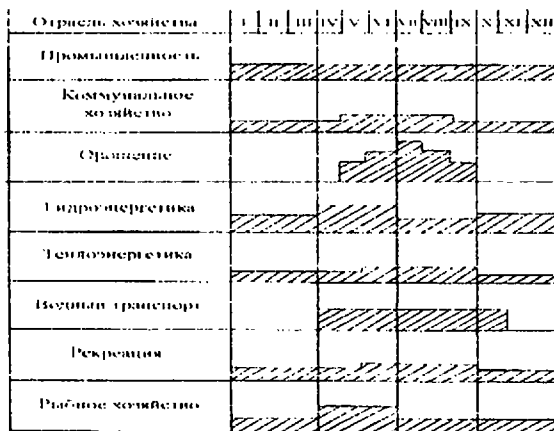


Рис. 6.1. Динамика водопользования в течение года различными отраслями хозяйства

Из рисунка видно, что в большинстве отраслей хозяйства максимум водопользования падает на летне-осеннюю межень. В то же время на этот длительный по времени период, продолжительностью 9–10 месяцев, приходится всего от 20 до 40% годового стока рек России, а более 50% годового стока проходит за 2–3 половодных месяца. Для того чтобы увязать во времени крайне неравномерный гидрограф речного стока с режимом водопользования, необходимо перераспределить водные ресурсы внутри года и между годами.

## **6.2. Определение и типы водохранилищ**

Наиболее распространенным и эффективным средством управления водными ресурсами и решения многих водных проблем является регулирование стока водохранилищами.

Водоохранилища – особая категория внутренних водоемов со специфическими особенностями водообмена, проточности и сезонного колебания уровня. На сегодня нет единого принятого во всех странах определения водохранилищ и четкого их разграничения по отношению к прудами и бассейнами. От первых они отличаются размерами, а от вторых – тем, что имеют преимущественно естественные ложа и берега.

По рекомендации Института водных проблем (ИВП РАН) водохранилищами следует считать искусственные водоемы с замедленным водообменом объемом более 1 млн. м<sup>3</sup>, уровенный режим которых постоянно регулируется гидротехническими сооружениями для накопления воды в целях ее хозяйственного использования.

С помощью водохранилищ решаются разнообразные хозяйственные задачи:

- гарантируется водоснабжение населения, промышленности, сельского хозяйства;
- создаются условия для использования гидроэнергетического потенциала рек;
- улучшаются условия судоходства и лесосплава;
- обеспечивается развитие рыбного хозяйства и ферм зверей и водоплавающих птиц;
- открываются новые возможности для организации отдыха;
- смягчается климат прилегающих территорий;
- водохранилища защищают от наводнений и путем попусков улучшают качество вод в реках.

Наряду с большой пользой, создание водохранилищ сопровождается и негативными последствиями, вызываемыми их строительством. Многие из них вызваны безразличным отношением к новым, весьма чувствительным географическим образованиям. Так, например, обрушению берегов водохранилищ способствуют распашка земель вплоть до уреза, отсутствие действенной водоохранной зоны по периметру водохранилищ. «Цветение» воды и как следствие ухудшение ее качества есть результат сброса в водохранилище неочищенных и слабоочищенных сточных вод и вод с сельскохозяйственной, а также грубая подготовка ложа водохранилища к затоплению. Возможные негативные явления, вызываемые водохранилищами, в настоящее время надежно прогнозируются и по возможности ликвидируются или смягчаются.

К числу параметров, определяющих основные размеры водохранилищ, следует отнести (рис. 6.2):

- ФПУ – форсированный подпорный уровень;
- НПУ – нормальный подпорный уровень;
- УМО – уровень мертвого объема;
- $V_{\text{полез.}}$  – полезный объем водохранилища;
- $V_{\text{умо}}$  – мертвый объем;
- $V_{\text{полн.}} = V_{\text{полез.}} + V_{\text{умо}}$  – полный объем водохранилища, соответствующий НПУ;
- $F_{\text{НПУ}}$  – площадь водной поверхности водохранилища при НПУ;
- $F_{\text{умо}}$  – площадь водной поверхности при УМО;
- $h_{\text{срб}}$  – уровень сработки водохранилища.

Под НПУ понимается наивысший уровень водохранилища, который подпорные сооружения могут поддерживать в нормальных условиях эксплуатации в течение длительного времени.

Под УМО понимается самый низший уровень, до которого сбрасывается водохранилище в процессе нормальной его эксплуатации.

Под полезным объемом водохранилища понимается объем, непосредственно осуществляющий регулирование стока. Он заключен в слое водохранилища высотой  $h_{\text{срб}}$  (между НПУ и УМО).

Мертвый объем – объем воды в водохранилище, который не может быть спущен при обычных условиях.

При пропуске катастрофических половодий и паводков допускается кратковременное повышение уровня воды в водохранилище над НПУ до отметки, называемой форсированным подпорным уровнем (ФПУ). Объем водохранилища, заключенный между ФПУ и НПУ, называется форсированным и используется для дополнительной трансформации (срезки) катастрофических максимальных расходов половодий и паводков.

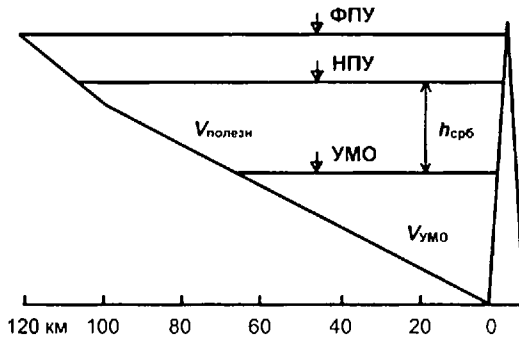


Рис. 6.2. Схематизированный профиль водохранилища.

Основные параметры водохранилища выбираются на основе анализа топографических, геологических, экономических, и природоохранных условий.

Топографические условия определяют площадь водного зеркала, объем водохранилища, его глубину и т.д.

Геологические условия определяют НПУ и возможную высоту подпорных сооружений (плотины). Например, все высокие плотины сооружены на скальных основаниях, являющихся с точки зрения несущей способности наиболее благоприятными.

Под экономическими условиями выбора НПУ понимаются денежные и материальные затраты, связанные с постройкой подпорных сооружений и компенсацией ущерба от затопления населенных пунктов, промышленных предприятий, сельскохозяйственных и лесных угодий и т.д. При выборе НПУ по возможности избегают затопления особо ценных хозяйственных объектов. По экономическим условиям местоположение водохранилищ и их НПУ выбирают, исходя из сохранения природного равновесия. Избегают затопления пахотных земель, лесных угодий, заповедных зон и уникаль-

ных природных комплексов. Так, на отдаленную перспективу отнесено сооружение таких водохранилищ на Енисее, как Средне-Енисейское и Осиновское, в зону затопления которых попадают около 70 млн. м<sup>3</sup> леса и пойменные земли.

Неиспользуемый, или мертвый, объем водохранилища, отвечающий УМО, должен предусматриваться при проектировании водохранилищ как одноцелевого, так и многоцелевого назначения. Он позволяет обеспечить следующее:

- минимальный объем воды в зоне отдыха;
- минимальный напор воды для выработки электроэнергии;
- резервный объем для будущего отложения наносов;
- минимальный объем воды для поддержания условий существования рыб и биоценоза;
- минимальные глубины для навигации;
- минимальный объем воды по условиям ее качества;
- минимальный уровень воды, гарантирующий бесперебойную работу сооружений, отводящих воду из водохранилища (каналов, трубопроводов, насосных установок).

Как правило, водохранилище не срабатывается ниже отметки мертвого объема, независимо от того, для какой цели этот объем предусматривается, однако уровень воды неиспользуемой призмы может меняться от сезона к сезону.

Методы определения мертвого объема водохранилища слабо освещены в технической литературе и приводятся главным образом в проектной документации. Иногда на предварительных этапах проектирования объем неиспользуемой призмы водохранилища принимается равным или большим того объема, который отводится для будущих отложений наносов, причем профиль отложений наносов предполагается плоским. Если при таком предположении не обеспечиваются удовлетворительные условия для рекреации, существования рыб и т.п., то для этих целей предусматривается дополнительный объем воды. Любые дополнительные затраты, к которым приведет увеличение неиспользуемого объема водохранилища, должны быть обоснованы соответствующими требованиями, под которые они предусматриваются. В проектной практике отметка УМО, как и НПУ, выбирается в результате технико-экономического рассмотрения нескольких вариантов. Выбирая НПУ, мы тем самым

выбираем полный объем водохранилища и максимальный напор на гидроузле, а выбирая УМО, – полезный объем водохранилища и минимальный напор, а также параметры, определяющиеся этой отметкой, например, гарантированную водоотдачу из водохранилища. Таким образом, параметры водохранилища являются взаимосвязанными и выбор их должен осуществляться как единое целое.

Пределы изменения параметров действующих водохранилищ:

- полный объем водохранилищ (при НПУ) изменяется от 1 млн. м<sup>3</sup> до 169,3 км<sup>3</sup> (Братское на р.Ангаре) и 204,8 км<sup>3</sup> (Оуэн-Фолс на оз. Виктория);

- площадь водного зеркала при НПУ – от 0,3 – 0,5 км<sup>2</sup> до 5900 км<sup>2</sup> (Куйбышевское на р. Волге) и 8480 км<sup>2</sup> (Вольта на р. Вольта);

- глубина – от нескольких метров до до 250 – 300 м;

- максимальная сработка водохранилищ (в пределах от НПУ до УМО) – от нескольких десятков сантиметров до 100 м.

Из практики проектирования величина сработки водохранилищ не должна превышать 1/3 максимального напора, а полный объем – двух-трех годовых объемов стока.

В последние годы появилось много работ (А.Б. Авакян, В.А. Шарапов, Б.Б. Богословский, Ю.М. Матарзин и др.), в которых с разной степенью детализации рассматриваются вопросы типизации водохранилищ по разным признакам. Прежде всего, в основу типизации водохранилищ должен быть положен признак их генезиса, указывающий на способ их образования. По генезису рекомендуется различать следующие типы водохранилищ.

- *Водохранилища в долинах рек*, перегороженных плотинами (речные водохранилища). Ложем их служат участки речных долин. Они характеризуются удлиненной вытянутой формой. Основной отличительной особенностью данного водохранилища является уклон днища и соответствующее увеличение глубин от верховьев к замыкающему створу водохранилища.

- *Зарегулированные озера* (озера-водохранилища). Ложем их служат озерные котловины. Они характеризуются округлой или слабо вытянутой формой. Основной отличительной особенностью водохранилищ озерного типа являются отсутствие одностороннего уклона дна и сосредоточение наибольших глубин в центральной части котловины.

– *Озерно-речные водохранилища смешанного типа*, ложе которых служат часть речной долины и озерная котловина. Они характеризуются узким вытянутым приплотинным участком и озеровидным расширением в центральной части водохранилища. Основной отличительной особенностью этого типа водохранилищ является хорошо выраженный порог в месте бывшего истока рски из озера.

– *Наливные водохранилища*, создаваемые в естественных понижениях местности, куда по каналам подводятся паводковые и паводковые воды. Такие водохранилища сооружаются большей частью в засушливых районах.

– *Подземные водохранилища*, при создании которых в качестве емкости используются подземные пустоты, например карстовые.

– *Морские водохранилища в прибрежных участках моря* – в морских заливах, бухтах, лиманах и эстуариях, отделенных от открытого моря дамбами.

В зависимости от полного объема и площади водной поверхности водохранилища делятся на типы, приведенные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

**Классификация водохранилищ по размерам  
(полному объему и площади)**

Тип водохранилища	Полный объем, км <sup>3</sup>	Площадь водного зеркала, км <sup>2</sup>
Крупнейшее	более 50	более 5000
Очень крупное	50 – 10	5000 – 500
Крупное	10 – 1	500 – 100
Среднее	1 – 0,1	100 – 20
Небольшое	0,1 – 0,01	20 – 2
Малое	< 0,1	< 2

В настоящее время в целях дальнейшего изучения динамики водохранилищ и процессов, происходящих и них, появилась необходимость рассматривать вопросы морфологии и морфометрии водохранилищ. При этом к основным морфометрическим показателям поверхности водохранилищ относятся: длина водохранилища  $L$  – расстояние от плотины до места выклинивания подпора по средней равноудаленной от берегов линии; средняя ширина  $B_{cp}$  – частное от деления площади водного зеркала  $F_0$  на длину  $L$ ; максимальная ширина  $B_{max}$  – расстояние по перпендикуляру к длине водоема между наиболее удаленными точками берегов (без учета глубоко вдающихся в сушу краевых плесов

и заливов); длина береговой линии –  $l$  – измеряется по нулевой изобате (урезу воды при НПУ) от плотины до выклинивания подпора отдельно для правого и левого берега; площадь водного зеркала поверхности водохранилища  $F_0$  при различных отметках уровня НПУ, ФПУ, УМО – определяется планиметрированием.

К морфометрическим показателям глубины и объема водохранилищ относятся: максимальная глубина ( $H_{\text{макс}}$ ), определяемая по данным промеров глубин или батиметрическим картам, и средняя глубина – частное от деления объема водной массы  $V$  на площадь  $F_0$ .

Хотя водохранилища впервые появились в глубокой древности, их с полным правом можно назвать порождением нашего века.

До XX в. крупные водохранилища создавались единицами. Полный объем всех водохранилищ планеты, унаследованных от XIX в., составлял  $15 \text{ км}^3$ . Сейчас же объем только Братского водохранилища на р. Ангаре составляет  $169 \text{ км}^3$ , т.е. в 11 с лишним раз превышает объем водохранилищ планеты, существовавших на рубеже двух веков. Массовый и повсеместный характер создание водохранилищ приобрело за последние 50 лет. За эти годы их число на земном шаре возросло почти в 4 раза, а объем увеличился в 8 раз. За этот период были созданы все самые крупные водохранилища мира (табл. 6.2).

Таблица 6.2

**Крупнейшие водохранилища России и зарубежных стран**

Водохранилище и год наполнения	Страна	Река, озеро	Объем, км <sup>3</sup>		Площадь зеркала, км <sup>2</sup>
			полный	полезный	
ОУЭН-Фолс (1968)	Танзания	Виктория	205	68	6900
Братское (1966)	Россия	Ангара	169	48.2	5467
Кариба (1963)	Замбия	Замбези	160	46	4450
Насер (1971)	АРЕ	Нил	157	74	5120
Вольта (1967)	Гана	Вольта	148	90	8480
Эль-Мантеко (1968)	Венесуэла	Карони	111	55	–
Гордон-Хрум (1968)	Канада	Пис-Ривер	108	37	1660
Красноярское (1970)	Россия	Енисей	73,3	30	2000
Зейское (1980)	–“–	Зeya	68.4	38,3	2419
Усть-Илимское (1979)	–“–	Ангара	59,4	2,8	1870
Куйбышевское (1957)	–“–	Волга	58,0	34,6	5900

В пределах России находится более 2000 водохранилищ. В табл. 6.3 приведены сведения по водохранилищам, прошедшим паспортизацию. Для сравнения даны сведения и по водохранилищам США.

Таблица 6.3

Сведения по водохранилищам					
Страна	Количество	Объем, км <sup>3</sup>		Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	
		полный	полезный	при НПУ	в том числе подпертых озер
Россия	1162	924,5	433,5	115 400	52 600
США	5500	850	556	60 000	20 000

### 6.3. Виды регулирования стока водохранилищами и их основные характеристики

Регулирование стока – перераспределение во времени объема стока в соответствии с требованиями водопользования. По степени перераспределения стока во времени различают следующие виды регулирования: суточное, недельное, сезонное, годовичное, многолетнее и соответственно водохранилища суточного, недельного, годовичного и многолетнего регулирования. Встречаются также компенсирующее и так называемое вторичное и непериодическое регулирование.

*Водохранилище суточного регулирования стока* предназначено для перераспределения в течение суток равномерного стока реки в соответствии с неравномерным водопотреблением, например, для повышения расходов в часы утреннего и вечернего максимума за счет снижения водопотребления в ночные и обеденные часы. Данный вид регулирования стока находит широкое использование в отраслях водоснабжения и энергетики, когда при недостатке воды в источнике суточное регулирование позволяет удовлетворить большее число водопотребляющих единиц, а главное – покрыть значительную часть графика электрической нагрузки.

Полезный объем водохранилища, необходимый для проведения суточного регулирования стока, численно равен объему избытков стока в ночные часы, когда расходы водопользования значительно меньше среднесуточного расхода реки (рис. 6.3).

Водохранилище недельного регулирования стока (рис. 6.4) предназначено для перераспределения в течение недели практически равномерного стока реки соответственно повышенному водопотреблению в рабочие дни и пониженному – в нерабочие. Объем водохранилища, необходимый для проведения недельного регулирования стока, также определяется объемом избытков в нерабочие дни недели.

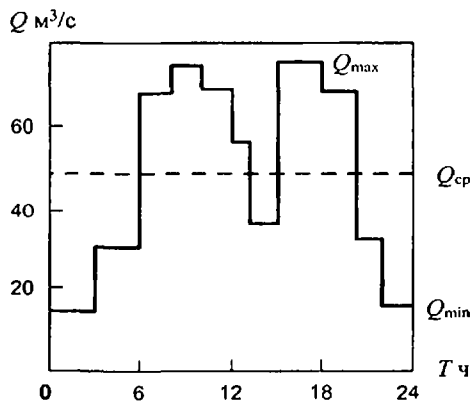


Рис. 6.3. Схема суточного регулирования стока.

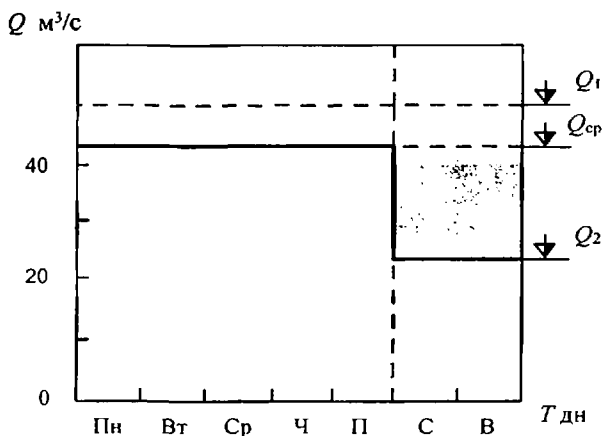


Рис. 6.4. Схема недельного регулирования стока.

*Водохранилище сезонного регулирования стока* предназначено для перераспределения стока из многоводных сезонов года в маловодные. Такое регулирование обусловлено внутригодовой неравномерностью стока и несовпадением величины стока и водопотребления во времени. Это наиболее распространенный вид регулирования.

Сущность сезонного регулирования сводится к следующему: в период превышения стока над используемым расходом водохранилище наполняется, а в период недостатков – сбрасывается (рис. 6.5). Величина потребного полезного объема водохранилища для осуществления сезонного регулирования определяется объемом дефицита стока (разность между используемым расходом и естественными расходами) в период межени.

После заполнения полезного объема (наполнение водохранилища до НПУ) часть стока может быть сброшена вхолостую, минуя водоприемные отверстия ГЭС или другого водопользователя.

Объемы превышения и дефицита стоков над потреблением в расчетном маловодном году балансируются только в том случае, когда зарегулированный (используемый) расход доведен до величины среднегодового расхода рассматриваемого года. Такое регулирование стока, при котором наблюдается полное выравнивание стока до величины среднегодового расхода расчетного маловодного года, называется годичным и соответствует теоретическому пределу сезонного регулирования стока.

*Водохранилище многолетнего регулирования стока* (рис. 6.6) предназначено для перераспределения стока не только внутри года, но и стока из многоводных и средневодных лет и периодов в маловодные.

Полезный объем водохранилища многолетнего регулирования численно равен объему дефицита стока за маловодное  $n$ -летие расчетной обеспеченности. Этот дефицит покрывается из многолетних запасов воды, создаваемых в водохранилище за предшествующий многоводный период. Теоретическим пределом многолетнего регулирования является полное выравнивание стока до среднегодового расхода. В этом случае холостые сбросы отсутствуют и при правильной эксплуатации водохранилища весь сток реки, за исключением испарения и фильтрации, может быть полезно использован для хозяйственных нужд (выработки электроэнергии, водоснабжения и т.д.).

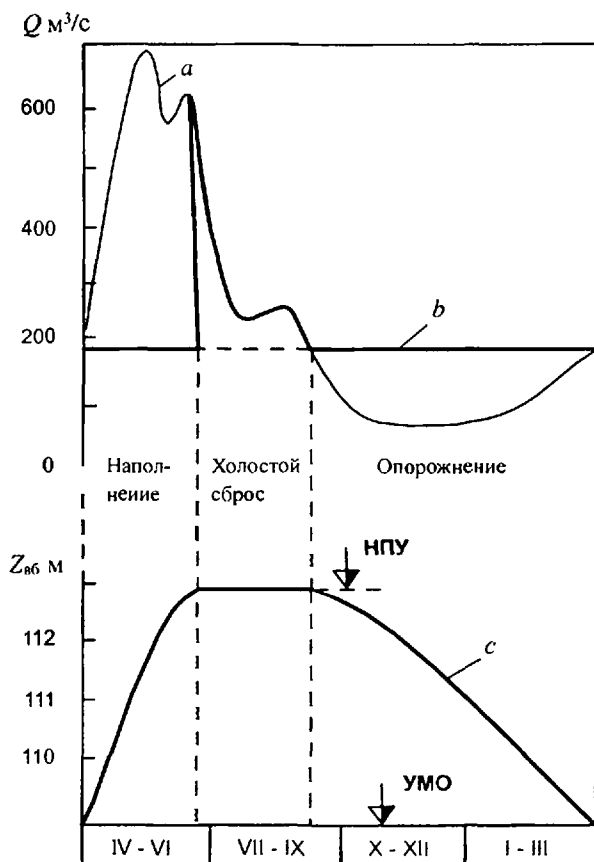


Рис. 6.5. Схема сезонного регулирования стока.  
*a* – естественные расходы воды, *b* – зарегулированные расходы воды,  
*c* – уровни воды верхнего бьефа водохранилища.

Добиться полного выравнивания стока возможно только ценой больших затрат на сооружение крупнейших водохранилищ, которые с хозяйственной точки зрения, как правило, не оправдываются. Однако в ряде случаев при создании водохранилищ на реках, сток которых в многолетнем разрезе выровнен (при относительно малых коэффициентах изменчивости годового стока –  $C_v$ ), иногда экономически целесообразно доведение зарегулированного расхода до

величины, близкой к среднемуголетнему расходу. Таким образом, полезный объем водохранилища находится в прямой зависимости от степени регулирования стока. Например, для суточного регулирования стока р. Волги в Куйбышевском водохранилище достаточен объем  $0,05 \text{ км}^3$ , для недельного –  $0,5 \text{ км}^3$ , для годовичного –  $35 \text{ км}^3$ , а для многолетнего регулирования стока потребовалось бы увеличение объема до  $70 \text{ км}^3$ .

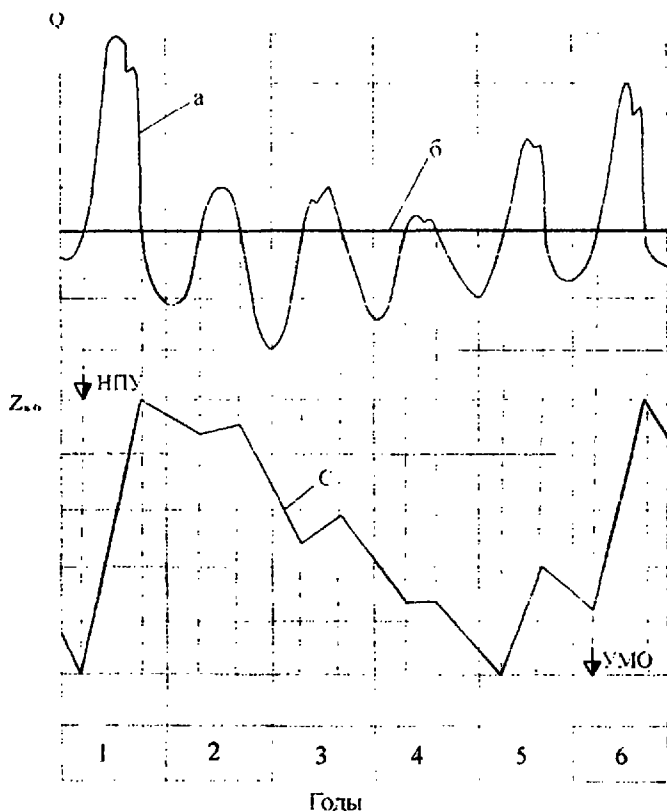


Рис. 6.6. Схема многолетнего регулирования стока  
(Условные обозначения на рис. 6.5.)

При сезонном регулировании стока цикл работы водохранилища (наполнение – сработка) замыкается в пределах одного водохранилища

зыйственного года, а при многолетнем этот цикл продолжается несколько лет. Маловодный период, в течение которого наполненное водохранилище полностью срабатывается, принято называть критическим периодом сработки водохранилища.

В водохозяйственной практике встречаются также другие виды регулирования – компенсирующие, так называемые вторичное и непериодическое регулирование речного стока.

*Компенсирующее регулирование* применяется при расположении пункта водозабора или водопользования ниже водохранилища, причем на участке между ними имеется значительный нерегулируемый сток, так называемый боковой приток или боковая приточность. В таком случае режим работы водохранилища устанавливается следующим образом. В первую очередь используются расходы боковой приточности. Попуски из водохранилища при этом дополняют расходы боковой приточности до требуемых расходов воды в пункте водозабора. Расчет полезного объема водохранилища, осуществляющего компенсирующее регулирование боковой приточности, проводится по расчетному маловодному году или расчетному маловодному периоду. Величина полезного объема водохранилища численно равна наибольшему объему дефицита притока в водохранилище по отношению к режиму компенсирующих попусков из него.

Представим себе, что створ водозабора расположен в равнинной части реки, где строительство водохранилища по экономическим и природоохранным требованиям нецелесообразно. Тогда водохранилище располагается в предгорной или горной части реки. Между ними имеется боковая приточность. Компенсирующий режим попусков из водохранилища обеспечивает покрытие дефицита между годовым графиком водопотребления в створе водозабора и расчетным гидрографом стока с незарегулированного участка. Для примера в табл. 6.4 дан расчет полезного объема водохранилища. Из таблицы следует, что полезный объем водохранилища, осуществляющего компенсирующее регулирование по условиям покрытия дефицита стока, равен  $6,29 \text{ км}^3$ . Объем холостых сбросов при этом равен  $13,27 \text{ км}^3$ . Наиболее широко этот вид регулирования организуется и проводится в каскаде из нескольких водохранилищ. При этом верхнее водохранилище (головное) проводит глубокое регулирование стока, а нижерасположенные – только недельное и суточное (см. гл. 13).

*Вторичное (или повторное) регулирование стока* – вид регулирования, который вызывается, в основном, не режимом стока, а режимом регулирования на вышерасположенной водохозяйственной установке, не удовлетворяющем требованиям потребителей воды, расположенных ниже. Так, например, гидроэлектростанция, регулирующая сток на покрытие суточных, недельных и сезонных максимумов нагрузки, может не удовлетворять (по суточному, недельному и годовому графикам турбинных расходов) условиям водного транспорта, нижерасположенным водозаборам промышленного и сельскохозяйственного назначения и т.п.

В таком случае требуется перерегулирование расходов ГЭС. Например, водохранилище Майнской ГЭС на Енисее выравняет суточную и недельную неравномерность расходов вышерасположенной Саяно-Шушенской ГЭС, в результате ниже Майнской ГЭС создаются нормальные условия для судоходства.

*Непериодическое регулирование* отличается от предыдущих видов тем, что оно не имеет точно закрепленного графика работы водохранилища. Сработка и наполнение водохранилища осуществляются по мере надобности и возможности. Этот вид регулирования применяется преимущественно в лесосплаве и в специальных случаях на водном транспорте, а также в санитарных, сельскохозяйственных и рыбохозяйственных целях. Оно осуществляется или специально созданными водохранилищами, или обычными (ведущими другие виды регулирования).

В лесосплаве непериодическое регулирование применяется наряду с суточным и сезонным. В отличие от сезонного, при котором сплавные условия обеспечиваются круглосуточно в течение всего периода проведения лесосплавных работ, при непериодическом (как и при суточном) регулировании необходимые для лесосплава условия создаются в продолжение нескольких часов, пока дается сосредоточенный попуск из водохранилища. При этом накопление воды в водохранилище (в отличие от суточного регулирования) производится в течение ряда суток.

В водном транспорте непериодическое регулирование применяется при необходимости повысить сосредоточенными попусками на некоторое время судоходные глубины на нижележащих перекатах.

В санитарных целях кратковременными сосредоточенными попусками пользуются для временного затопления участков реки, зараженных личинками малярийного комара, с целью борьбы с оча-

гами малярии. В последнее время практикуются попуски для регулирования качества речной воды, загрязненной промышленными и бытовыми стоками. Такие попуски вследствие разбавления снижают концентрацию минеральных и органических примесей, оказывают положительное влияние на процессы самоочищения реки и, следовательно, являются эффективным водоохранным мероприятием.

Таблица 6.4

**Таблица расчета компенсирующего регулирования стока боковой приточности на участке между водохранилищем и нижерасположенным створом водозабора в маловодный год расчетной обеспеченности**

Месяц	Расход водозабора $Q_{тр}$ , м <sup>3</sup> /с	Расход боковой приточности $Q_{б.пр}$ , м <sup>3</sup> /с	Требуемый расход водохранилища $Q_{нщ} = Q_{тр} - Q_{б.пр}$ , м <sup>3</sup> /с	Приток в водохранилище, м <sup>3</sup> /с		Расход аккумуляции $Q_{акк} = Q_{лето} - Q_{нщ}$ , м <sup>3</sup> /с	Объем аккумуляции $V_{акк} = Q_{лето} \Delta t$ , км <sup>3</sup>	Наполнение водохранилища на конец месяца, км <sup>3</sup>
				естественный $Q_{брутто}$	за вычетом потерь, $Q_{лето}$			
								0
V	1500	2480	0	2550	2660	2660	7,00 / 6,29	6,29
VI	1500	3570	0	3020	3010	3010	7,92 / 0	6,29
VII	1500	990	510	1860	1845	1335	3,51 / 0	6,29
VIII	1500	670	830	1280	1260	430	1,13 / 0	6,29
IX	1500	515	985	965	945	-40	-0,10	6,19
X	1500	381	1119	649	634	-485	-1,28	4,91
XI	800	132	668	340	330	-338	-0,89	4,02
XII	800	249	551	328	308	-243	-0,64	3,38
I	800	184	616	296	246	-370	-0,98	2,40
II	800	136	664	262	202	-462	-1,22	1,18
III	800	148	652	234	204	-448	-1,18	0
IV	1200	780	420	450	420	0	0	0
Сумма	14 200	10 235	7015		12 064	5 049	13,27/0	

В сельском хозяйстве временными попусками пользуются для затопления пойменных луговых угодий и при лиманном орошении, а в рыбном хозяйстве – для повышения глубин в местах нерестилищ (в низовьях Волги, Дона и пр.).

#### **6.4. Влияние водохранилищ на гидрологический режим водотоков и природу прилегающих территорий**

Водоохранилища создаются для регулирования (перераспределения) крайне неравномерного во времени и по территории естественного речного стока в интересах хозяйства. В то же время, создаваемые искусственно водоемы могут оказывать негативное воздействие на природную среду. С целью повышения хозяйственной эффективности водохранилищ и снижения их негативных последствий необходимо предвидеть механизм этих воздействий на процесс стока и окружающую среду прилегающих территорий.

По характеру воздействий водохранилищ на природные условия их условно разделяют на прямые и косвенные.

*Прямые воздействия* сводятся к следующему. Главным из них является затопление земли, которое полностью исключить не представляется возможным. Общая площадь затопленных водохранилищами земель в России составляет 4,5 – 4,6 млн. га или 0,27% от общего земельного фонда страны. В государствах с более развитым водным и гидроэнергетическим хозяйством доля затопленных водохранилищами земель выше, чем в России: в США – в 3 раза, в Канаде – в 2,2 раза, в Испании – на 56%.

Из общей площади затопленных в России земель 2,18 млн. га приходятся на лесные угодья, 1,68 млн. га – на сельскохозяйственные угодья (в том числе 0,48 млн. га – на пашню) и 0,75 млн. га – на прочие земли.

Дополнительное отчуждение земель вызвано подтоплением берегов, которое обусловлено подъемом уровней грунтовых вод под воздействием подпора уровней в реке. Площадь подтопленных водохранилищами ГЭС земель составляет 3 – 15% от площади затопления. Общая площадь подтопления не установлена из-за отсутствия гидрогеологических наблюдений.

Вследствие появления больших водных поверхностей значительно усиливаются волновые процессы на водохранилищах. При этом ветровые волны достигают высоты 4 – 5 м, вызывая трансформацию берегов водохранилищ. Указанное явление получило название «переработки берегов». В результате переработки береговая линия отступает на десятки и сотни метров (водохранилища Волжского каскада, Новосибирской ГЭС и т.д.), что приводит к по-

терям территории. Площадь земель, расположенных в зоне переработки берегов, составляет обычно 3 – 5% от площади затопления.

Из-за неправильного выбора подпорных уровней водохранилищ и интенсивного берегообрушения на ряде водохранилищ появляются мелководья, в результате чего происходят неблагоприятные гидробиологические и гидрохимические процессы, влекущие за собой цветение воды и ухудшение в связи с этим санитарного состояния водоема. Это положение усугубляется сбросом в водохранилища плохо очищенных сточных вод и резким замедлением водообмена. Так, например, в наиболее крупных зарегулированных речных системах (Волга, Ангара, Енисей и др.) водообмен (полное обновление объема воды) замедлился не менее чем на порядок.

Образование водохранилищ и сопутствующий ему подъем уровня грунтовых вод может оказать влияние на ход оползневых процессов в его берегах, активизируя старые или вызывая новые процессы.

Одним из негативных факторов является и социальный вопрос, связанный с переселением людей. К настоящему времени из зон водохранилищ переселено около 1 млн. человек.

Создание водохранилищ негативно воздействует и на рыбное хозяйство. Здесь следует указать на два обстоятельства. С одной стороны, подпорные сооружения препятствуют проходу рыбы к местам нерестилищ, а с другой – требования рыбного хозяйства к режиму уровней водохранилищ и стоку из них полностью противоречат тем целям, для которых собственно и создается водохранилище.

Создание водохранилищ и сам процесс регулирования речного стока приводят к изменению гидрологического режима в обоих бьефах.

Из-за увеличения зеркала водной поверхности возрастает испарение, что влечет за собой заметное увеличение безвозвратных потерь воды из верхнего бьефа реки.

Изменяется гидрологический режим и в нижнем бьефе гидроузла и тем значительнее, чем больше глубина проводимого регулирования стока. В результате регулирования стока резко повышаются меженные (летние и зимние) расходы и снижаются высокие (половодные и паводочные) расходы.

Вследствие срезки пиков паводков уменьшаются затопления в нижнем бьефе, что приводит к обезвоживанию пойм и их постепенному остепнению.

Повышение зимних расходов, сбрасываемых в нижний бьеф из глубинных слоев водохранилищ, температура которых более высокая, чем в реке, приводит к образованию полыньи. Длина полыньи нередко достигает нескольких десятков километров (80 – 100 км и более в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на р. Енисее; 40 – 60 км в нижнем бьефе Вилюйской ГЭС на р. Вилюе; 15 – 20 км в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС и т.д.). Размеры полыньи определяются глубиной водохранилища, величиной зимнего зарегулированного расхода и метеорологическими условиями (температура воздуха, облачность и т.д.). Полынья – это "фабрика шуги". Интенсивное образование шуги приводит к зазорным подъемам уровней (до 4 – 5 м), в результате которых наблюдаются зимние затопления и подтопления (р. Енисей ниже Красноярской ГЭС, нижний бьеф Беломорской ГЭС и т.д.).

Изменение температурного режима воды в нижнем бьефе нарушает ледовые переправы, что затрудняет транспортные связи с островами и берегами водотока (Енисей, Обь, Вилюй). Заметное снижение температуры воды в водохранилище летом и осенью, по сравнению с температурой воды в реке, приводит к более раннему ледоставу и сокращению сроков навигации и изменению фауны.

Из-за оседания значительной части наносов в водохранилище в нижний бьеф сбрасывается осветленный поток, обладающий повышенной размывающей способностью. Это приводит к интенсивным размывам русла, которые продолжают длительное время и распространяются на большие расстояния.

Деформация русла на протяжении нижнего бьефа усиливается под воздействием проводимого на ГЭС недельного и суточного регулирования, в результате которых увеличиваются скорости течения. В связи с размывом русла снижаются (проседают) уровни в реке как непосредственно ниже гидроузла, так и на значительном расстоянии от него. По опыту эксплуатации многих гидроузлов на реках нашей страны величина понижения уровней непосредственно у плотины изменялась от 0,50 до 1,10 м и более. При этом ухудшались условия работы водозаборов, падали навигационные глубины, обнажался неморозостойкий бетон и т.д.

*Косвенные воздействия водохранилищ на окружающую среду изучены не столько полно, как прямые, хотя некоторые формы их проявления уже очевидны сейчас.*

На территориях, прилегающих к крупным водохранилищам, происходит изменение микроклимата. На этих территориях наблюдается повышение влажности воздуха и образование довольно частых туманов, изменяется направление и скорость ветра, уменьшается годовая амплитуда температуры воздуха и т.д.

К косвенным воздействиям водохранилищ следует отнести и возникновение или повышение сейсмической активности в прилегающих к ним районах. Например, при заполнении Нурекского водохранилища на р. Вахш число землетрясений возросло до 30 – 40 в 10-летие против 3 – 4 до заполнения водохранилища. Это потребовало замедления наполнения водохранилища.

Конечно, было бы неправильно утверждать, что все прямые и косвенные воздействия водохранилищ ГЭС на окружающую среду, а их гораздо больше, чем здесь рассмотрено, имеют только негативную сторону. Обычно каждое из них и в совокупности обладают комплексом как отрицательных, так и положительных свойств. Так, появление в водохранилище мелководий может иметь и положительное значение, если на их месте создать условия для разведения дикого риса, водоплавающей птицы, нутрии, ондатры. Из заиленной прибрежной зоны можно извлекать высокопродуктивное удобрение – ил. Снижение максимальных расходов воды, сбрасываемых в нижний бьеф, уменьшает наводнения в нижнем бьефе и создает условия для эффективного развития прибрежных районов. Увеличение водности зимой обеспечивает лучшее разбавление стоков и способствует интенсификации процессов самоочищения на обводненных участках рек, без чего их санитарное состояние было бы значительно хуже. Как уже отмечалось, при создании водохранилищ в зону затоплений и подтоплений попадают высокопродуктивные сельскохозяйственные земли, что наносит определенный ущерб сельскому хозяйству. Вместе с тем на базе созданных водохранилищ интенсивно развивается орошаемое земледелие, как в верхнем бьефе, так и в нижнем бьефе на землях, ранее затоплявшихся при наводнениях. Эффект при этом в сельском хозяйстве в ряде случаев значительно превосходит наносимые ущербы (Бурейское, Зейское и другие водохранилища).

Нельзя утверждать, что все формы воздействия водохранилищ являются неизбежными и органическими пороками гидротехнического строительства. Многие из них, выявленные в процессе созда-

ния и эксплуатации водохранилищ, явились следствием неправильного проектирования и нарушения установленных правил эксплуатации (рыбное хозяйство, зимние затопления и подтопления, подвижки льда и т.д.).

Бороться с главным негативным фактором строительства водохранилищ – затоплением сельскохозяйственных земель – можно путем размещения водохранилищ в малонаселенных горных и предгорных районах страны на участках рек с большими уклонами дна. Такая политика уже позволила в настоящее время снизить объективный показатель затопления площади на 1 млн. кВт · ч. выработки энергии. В 1950-х годах, когда крупные водохранилища строились на равнинных реках Европейской части страны, этот показатель составлял 78 га, а к 1981–1990 гг. он снизился до 6 га. Эта величина примерно сохраняется и в будущем. Что касается сельскохозяйственных подтопленных земель, то они из дальнейшего использования не исключаются, а могут быть использованы в качестве сенокосов.

Несмотря на резкое сокращение удельного показателя затопления земли на водохранилищах нового поколения, по-прежнему возникают предложения общественности по уменьшению акваторий ряда водохранилищ на р. Волге и даже их опорожнению. На основании анализа проведенных несколькими проектными институтами технико-экономических расчетов последствий снижения отметок НПУ для Рыбинского (площадь зеркала 4550 км<sup>2</sup>) и Куйбышевского (площадь зеркала 5900 км<sup>2</sup>) водохранилищ такие мероприятия были признаны экономически неэффективными и приносящими крупнейший экономический ущерб стране вследствие разрушения создававшихся десятилетиями энергетических, водоснабженческих, коммунальных, транспортных и других систем всего Поволжья.

Вредные воздействия водохранилищ на рыбное хозяйство удается в значительной степени нейтрализовать правильным проектированием и надлежащим уровнем эксплуатации водохранилищ (строительство рыбоводных заводов, нерестово-выростных хозяйств, рыбоводных каналов до перекрытия русла и т.д.). Переход от рыболовства к рыбоводству позволил на некоторых водохранилищах уже сегодня достичь высоких показателей рыбопродуктивности.

Сегодня ставится задача строительства водохранилищ нового поколения, которые наносят минимальный ущерб природе, но одновременно и компенсируют эти потери путем решения острых со-

циальных и других жизненно важных вопросов регионов, где они строятся. Так, например, при разработке проектов водохранилищ ГЭС на Дальнем Востоке в них предусматривается ввод в строй жилья, посадки леса и даже создание национальных парков. Очень важно сейчас проводить последовательную политику по упорядочению экологической обстановки на водохранилищах гидроэлектростанций. Следует сразу отметить, что эта проблема затрагивает всех водопользователей.

Серьезный ущерб водохранилищам наносят не столько природные процессы, такие, как заиление, переработка берегов, изменение температуры воды и т.п., но и деятельность человека. Из антропогенных факторов можно выделить следующие:

- высокие темпы загрязнения водохранилищ сточными водами промышленных и бытовых объектов;
- смыв удобрений с непомерно приблизившихся к урезу воды сельскохозяйственных территорий;
- загрязнение воды транспортными средствами, особенно при перевозке нефтепродуктов, и др.

Решение проблемы заключается, в первую очередь, в организации очистки сточных вод, проведении агротехнических мероприятий и т.п. В то же время необходимы и гидротехнические мероприятия – рациональное регулирование режима уровней и течений в водохранилищах, организация их промывов, ликвидация мелководий и т.д. Необходимо активно решать вопрос о ликвидации леса в ложе водохранилища и качественной подготовке будущей чаши водохранилища к затоплению.

#### **6.5. Основные направления по снижению площадей затопляемых земель при создании водохранилищ**

Практика показывает, что в целях сокращения или мягкого воздействия на природные ландшафты водохранилища целесообразно создавать путем разумного подъема естественных уровней озер, так называемые озера-водохранилища или озерные водохранилища.

Водоохранилища озерного гидроэкологического типа – это естественные озера, уровень воды в которых поднят плотиной, расположенной в истоке озерной реки или на некотором удалении от него. При создании озерного водохранилища затоплению подвергается, как правило, сравнительно узкая полоса прибрежной территории

озерной котловины, площадь которой намного меньше акватории самого озера. В преобразованном таким образом озере затопленная наземная экосистема трансформируется в прибрежную, что в большинстве случаев не оказывает заметного влияния на жизнь озерной экосистемы в целом.

Русловые водохранилища лучше создавать на горных и предгорных реках. При этом за счет значительного подъема уровней реки и малой площади затопления можно иметь полезные объемы, осуществляющие глубокое регулирование речного стока.

Показателем, характеризующим утрату ландшафтов в результате затопления земель, может служить коэффициент  $K$ , характеризующий отношение полезного объема водохранилища ( $V_{плз}$ ) к площади его водного зеркала ( $F$ ) при наивысшем подпорном уровне. Физически он представляет возможную величину создаваемого полезного объема водохранилища на единицу затопляемой при этом площади земель, т.е.

$$K = \frac{V_{плз}}{F}.$$

Рассмотрим величину этого коэффициента на примере озерных и русловых водохранилищ.

а) Озера-водохранилища.

Более емкие по полезному объему водохранилища при наименьшей площади затоплений можно создать на базе естественных водоемов (озер), так называемые, озера-водохранилища. При значительной естественной водной поверхности озера за счет незначительного подъема его уровней (в пределах максимально наблюдаемой амплитуды колебаний) можно создать объемы водохранилищ, способные осуществлять глубокое регулирование стока. При этом площади затоплений (разность между площадями водной поверхности водохранилища при наивысшем подпорном уровне –  $F$  и естественного водоема –  $F_{оз}$ ) будут изменяться незначительно.

Для озер-водохранилищ коэффициент  $K$  равен отношению  $V_{плз}$  к  $\Delta F = F - F_{оз}$ , т.е.

$$K = \frac{V_{плз}}{\Delta F}.$$

Анализ коэффициентов  $K$  для озер-водохранилищ проведен на примере Карелии и Кольского полуострова.

Исследуемый регион включает Мурманскую область и республику Карелию.

Главное назначение водохранилищ в Карелии и Мурманской области, особенно крупных, обеспечить работу ГЭС. Некоторые водохранилища, например Выгозерское, имеют большое значение для судоходства. Многие небольшие и средние водохранилища важны для лесосплава. Чаще всего водохранилища используются в нескольких целях.

Наиболее крупные водохранилища расположены в составе действующих и строящихся гидроэлектростанций.

По опубликованным данным, на территории Севера и Северо-Запада действуют и строятся 91 водохранилище суммарным объемом 106,6 км<sup>3</sup> и полезным объемом 58,3 км<sup>3</sup>. Площадь водного зеркала всех водохранилищ составляет 25,8 тыс. км<sup>2</sup>, в том числе без учета озер только 6,2 тыс. км<sup>2</sup>. Площади водохранилищ изменяются от 1–2 до 9700 км<sup>2</sup> (Онежское озеро), а длина их – от 3–5 до 160 (Ловозерское) – 280 км (Онежское). Глубина большинства водохранилищ за счет естественной глубины озер довольно значительна и составляет для некоторых 60–130 м (Имандровское, Инари, Онежское).

Всего рассмотрено 11 достаточно крупных водохранилищ, созданных в озерных котловинах. Характеристика их параметров дана в табл. 6.5.

Все они, кроме Ковдозера, Выгозера, Пальозера и Куйто, осуществляют многолетнее регулирование стока.

Анализируя приведенные в таблице коэффициенты ландшафтности ( $K$ ), можно сделать вывод, что более емкими по полезному объему на единицу затопляемой площади оказались Сегозерское и Имандровское водохранилища (64,5 и 43,5 млн. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>). При этом площадь озер увеличилась соответственно на 8,2 и 8%. Для остальных озер коэффициенты находятся в пределах 10, за исключением Пяозерского и Пальеозерского водохранилищ (17,3 и 17,6) и Ковдозерского водохранилища (2,0). Приращение площадей водной поверхности озер колеблется от 107 (Ковдозеро) и в пределах 50% (Пяозеро, Пиренга) до 8–17% – все остальные озера, кроме Топозера, площадь которого не изменилась. Полезный объем Топозера создан за счет выполнения расчисток в истоке р. Сафьянги из Топозера. Это позволило при сохранении площади водного зеркала озера создать регулирующий (полезный) объем в 3,19 км<sup>3</sup>.

Таблица 6.5

**Озера-водохранилища Карелии и Кольского полуострова**  
 $(\Delta Z$  – величина подпора озера, м;  $V_{оз}$  – объем водной массы озера, км<sup>3</sup>;  
 $V$  – полный объем, а  $V_{пол}$  – полезный объем водохранилища, км<sup>3</sup>;  
 $F_{оз}$  и  $F$  – площади водной поверхности озера и водохранилища, км<sup>2</sup>;  
 $K = V_{пол}/(F - F_{оз})$ , млн. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>)

Название водной системы и озер-водохранилища	Год	$\Delta Z$	$\frac{V_{оз}}{V}$	$V_{пол}$	$\frac{F_{оз}}{F}$	$K$
р. Ковда						
Топозеро	1958	0,0	$\frac{15,0}{15,0}$	3,19	$\frac{986}{986}$	0,0
Пяозеро	1958	9,0	$\frac{10,0}{15,4}$	5,44	$\frac{659}{973}$	17,3
Ковдозеро	1955	7,2	$\frac{=}{3,43}$	1,92	$\frac{294}{610}$	6,1
р. Выг						
Сегозеро	1957	6,3	$\frac{17,6}{21,6}$	4,0	$\frac{753}{815}$	64,5
Выгозеро	1933	6,3	$\frac{3,38}{6,44}$	1,4	$\frac{1143}{1250}$	13,0
р. Суна						
Сандал	1929	2,8	$\frac{1,83}{19,0}$	0,30	$\frac{157}{184}$	11,0
Пальеозеро	1936	2,7	$\frac{=}{2,0}$	0,16	$\frac{100}{109}$	17,6
р. Кемь						
Ср. и Ниж. Куйто	1956	2,0	$\frac{=}{1,27}$	0,67	$\frac{398}{465}$	9,96
р. Нива						
Пиренга	1936	5,0	$\frac{=}{3,0}$	0,87	$\frac{152}{227}$	11,6
Имандра	1936	1,0	$\frac{=}{11,2}$	2,83	$\frac{876}{941}$	43,5
р. Воронья						
Ловозеро	1970	1,1	$\frac{1,15}{1,18}$	0,20	$\frac{200}{223}$	8,7

Для справки: коэффициент  $K$  в среднем для водохранилищ России составляет 3,76, а США для водохранилищ – 9,26.

#### б) Русловые водохранилища.

Русловые водохранилища создаются в результате подпора воды в реке перегораживающей ее плотиной.

Количественная оценка последствий создания подобных водохранилищ по экологическим параметрам (утрата ландшафтов, водообмен

и др.) дана на примере водохранилищ ГЭС Волжско-Камского каскада, расположенного на равнинных реках, и Ангаро-Енисейского каскада, расположенного в горных и предгорных районах России. Основные параметры водохранилищ даны в табл. 6.6 и 6.7.

Таблица 6.6

**Водохранилища Волжско-Камского каскада**

( $H_m$  – максимальная глубина, м;  $L$  – длина, км;  $F$  – площадь, км<sup>2</sup>;

$V$  – полный, а  $V_{плз}$  – полезный объемы, км<sup>3</sup>;

$K_n$  – коэффициент водообмена;  $K = V_{плз}/F$ , млн. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>)

Название водной системы и водохранилища	Год	$\frac{H_m}{L}$	$F$	$\frac{V}{V_{плз}}$	$K_n$	$K$
р. Волга						
Иваньковское	1937	$\frac{19}{120}$	327	$\frac{1,10}{0,81}$	7,9	2,48
Угличское	1940	$\frac{19}{145}$	249	$\frac{1,20}{0,80}$	9,8	3,22
Рыбинское	1941	$\frac{28}{112}$	4550	$\frac{25,4}{1,44}$	1,4	3,17
Горьковское	1955	$\frac{22}{430}$	1590	$\frac{8,80}{2,78}$	6,0	1,75
Чебоксарское	1981	$\frac{13}{340}$	1080	$\frac{4,60}{0,57}$	24,3	0,53
Волжское (Куйбышевское)	1957	$\frac{41}{510}$	5900	$\frac{57,3}{34,6}$	4,2	5,86
Саратовское	1969	$\frac{33}{336}$	1831	$\frac{12,9}{1,75}$	19,1	0,95
Волжское (Волгоградское)	1961	$\frac{41}{524}$	3117	$\frac{31,5}{8,65}$	8,0	2,76
р. Кама						
Камское	1954	$\frac{30}{300}$	1915	$\frac{12,2}{9,20}$	4,2	4,80
Воткинское	1966	$\frac{28}{365}$	1120	$\frac{9,36}{3,70}$	5,7	3,30
НижнеКамское	1978	$\frac{14}{270}$	1000	$\frac{2,80}{0,90}$	6,6	0,90

Все они осуществляют глубокое сезонное регулирование стока.

Эти водохранилища, кроме Усть-Илимского, проводят многолетнее регулирование стока.

Иркутское водохранилище создано в основном за счет подпора уровней оз. Байкал. При этом площадь озера увеличилась, по отношению к естественной, на 1465 км<sup>2</sup>, или в пределах 5%.

Таблица 6.7

**Водохранилища Ангаро-Енисейского каскада**  
 ( $H_{\max}$  – максимальная глубина, м;  $L$  – длина, км;  $F$  – площадь, км<sup>2</sup>;  
 $V$  – полный, а  $V_{\text{пл}}$  – полезный объемы, км<sup>3</sup>;  
 $K_{\text{в}}$  – коэффициент водообмена;  $K = V_{\text{пл}} / F$ , млн. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>)

Название водной системы и водохранилища	Год	$\frac{H_{\max}}{L}$	$F$	$\frac{V}{V_{\text{пл}}}$	$K_{\text{в}}$	$K$
р. Ангара						
Иркутское	1958	–	32 960	$\frac{—}{47,65}$	–	32,5
Братское	1967	$\frac{150}{1020}$	5467	$\frac{169,7}{48,2}$	0,5	8,80
Усть-Илимское	1977	$\frac{97}{290}$	1922	$\frac{58,9}{27,7}$	1,7	14,4
р. Енисей						
Саяно-Шушенское	1987	$\frac{217}{290}$	633	$\frac{29,13}{14,67}$		23,17
Красноярское	1971	$\frac{101}{390}$	2000	$\frac{73,3}{30,4}$	1,2	15,2

Анализ речных водохранилищ показывает, что водохранилища, создаваемые на равнинных реках, являются менее емкими на единицу затопления. Если на Волжско-Камских водохранилищах на 1 км<sup>2</sup> затопленной площади приходится 1 – 3 млн. м<sup>3</sup> регулирующего (полезного) объема, кроме Куйбышевского и Камского водохранилищ, на которых эта величина увеличивается до 5 – 6 млн. м<sup>3</sup>, то для Ангаро-Енисейских водохранилищ на 1 км<sup>2</sup> площади приходится уже до 10 – 20 млн. м<sup>3</sup> полезного объема. Таким образом, водохранилища, создаваемые на горных и предгорных реках, являются более емкими на единицу площади затоплений, а следовательно, и более эффективными в плане сокращения площадей затопления земель и увеличения располагаемых к использованию водных и энергетических ресурсов.

Коэффициенты водообмена (число водообменов в год) для водохранилищ на Волге и Каме оказались значительно выше, чем на Ангаре и Енисее. Это объясняется разницей в объемах водохранилищ и годового (речного) стока на равнинных и горных реках.

Таким образом, в целях сокращения или мягкого воздействия на природные ландшафты водохранилища целесообразно создавать:

– путем разумного подъема естественных уровней озер. Незначительное увеличение при этом площадей водного зеркала озер

для большинства озерных водохранилищ не может вызвать нарушений экологического равновесия озерных систем;

- на базе естественных водоемов можно создавать полезные объемы и без изменения площадей их водного зеркала, т.е. путем расчисток русла в истоке рек, вытекающих из них. Примером тому является водохранилище на оз. Топозеро;
- на горных и предгорных реках.

### **6.6. Другие мероприятия по увеличению располагаемых к использованию водных ресурсов**

Накапливать и хранить воду можно там, где она есть. Многие районы России бедны водными ресурсами. При этом они отличаются прекрасными климатическими условиями, плодородными почвами и высокой плотностью населения. Тогда возникает необходимость территориального перераспределения стока из районов, богатых водными ресурсами, в районы, испытывающие их дефицит.

По данным РосНИИВХ, в 1999 г. в стране действовало 37 систем межбассейнового перераспределения стока суммарной протяженностью около 3 тыс. км. Этими системами перераспределяется более 15 км<sup>3</sup> воды в год.

Основные параметры некоторых каналов комплексного назначения даны в табл. 6.8.

*Таблица 6.8*

#### **Основные параметры некоторых каналов Европейской территории России**

Река донор – река реципиент	Канал	Длина, км	Годовой объем переброски, км <sup>3</sup>	Год ввода
Волга – Москва	им. Москвы	128	2,3	1937
Кубань – Калаус	Большой Ставропольский	160/460*	2,5/6,0*	1957
Кубань – Егорлык	Невинномысский	50	1,9	1948
Дон – Сал-Маньч	Донской Магистральный	110	1	1958
Терек – Кума	Терско-Кумский	150	2,7	1961

\* В знаменателе дано расчетное значение.

Для водообеспечения маловодных сельскохозяйственных районов широко используются групповые водоводы. Их протяженность составляет от нескольких десятков до нескольких сотен километров.

В настоящее время Российская Федерация имеет глубоководные пути, обустроенные каналами и шлюзами для перевозки грузов, с выходом в Белое, Балтийское, Каспийское и Азовское моря. Это Беломоро-Балтийский канал, соединяющий Белое море с Онежским озером. Общая длина пути – 227 км, из них 37 км – искусственные пути. Следующие каналы – Волго-Балтийский водный путь общей протяженностью 368 км и Волго-Донской судоходный канал, соединяющий Волгу и Дон. Длина его 101 км, из них 45 км проходят по рекам и водохранилищам. Некоторые каналы используются комплексно.

Транспортировка воды по открытым земляным каналам всегда сопровождается большими потерями воды на испарение и фильтрацию в грунт. Ежегодные издержки «транспорта» составляют по самым оптимистическим данным до 25% суммарного объема переброски речных вод.

Уменьшить объем воды, бесплодно утекающий в грунт трассы каналов и заболачивающий их берега, можно, улучшая облицовку каналов, но при этом значительно возрастает стоимость их строительства. Другой проблемой межбассейнового перераспределения стока является совместимость вод донора и приемника (соленость, химический состав, подщелачивание вод по трассе канала и др.).

Территориальное перераспределение водных ресурсов имеет значительное влияние на элементы окружающей среды. Причем это влияние бывает также прямым и косвенным.

Первое проявляется в изменении вдоль трассы каналов рельефа, растительного и животного мира, водного режима почв и подстилающих пород, микроклимата и других компонентов природы. Косвенное влияние проявляется через воздействие на окружающую среду развивающихся на базе водных ресурсов отраслей промышленности, сельского и коммунальных хозяйств.

Поэтому при планировании территориального перераспределения стока необходимо тщательно изучать и научно обосновывать возможные изменения природной обстановки и вызываемые ими последствия с тем, чтобы в будущем это не обернулось экологической трагедией.

Снизить дефицит водных ресурсов в предгорных районах Урала, на значительной части Сибири и Дальнего Востока, т.е. районов с континентальным климатом, возможно и путем направленного регулирования стока и водного режима с помощью ледохранилищ (наледей).

По экспертно-ориентировочным расчетам, реализация ледотермического регулирования (управления) в горных районах позволит увеличить сток в летний период до 20% от годового стока, при этом возможно более полное удовлетворение потребителей в воде при обеспечении водоемких производств, всех видов водоснабжения, а также увеличить транспортирующую возможность рек, особенно малых, в летнюю межень при лесосплаве и судоходстве.

Данная проблема состоит из следующих частей:

- экономической – цена дополнительной талой воды для предгорных районов в 10–15 раз меньше тарифной стоимости воды. Создание наледей не требует больших капитальных вложений и строительных материалов, что очень важно в настоящее время;

- водно-ресурсной – поиск и оценка наледообразующих вод. Для создания наледей могут быть использованы зимний речной сток и подземные воды, а также шахтные и другие второстепенные воды;

- технической – разработка способов извлечения наледообразующих вод, подачи их к месту намораживания, регулирование интенсивности таяния льда. Ледяные массивы можно создавать двумя способами: свободным напуском воды и брызговым намораживанием;

- экологической – оценка возможного неблагоприятного воздействия создания наледей на природную среду. Возможен следующий спектр отрицательных воздействий: с течением времени на участке наледообразования полностью отмирает растительность при ежегодной толщине льда более 1,5 м, изменение температурного режима речных вод, ухудшение качества речных и подземных вод стимуляторами таяния льда. Таяние искусственных наледей в нужное по условиям водопотребления время интенсифицируется (стимулируется) путем нанесения на поверхность наледей химических реагентов; зачернения поверхности наледей темной пылью, угольным шлаком, сажой, песком; разрыхления наледей путем взрывов гидравлическим размывом льда.

В заключение в табл. 6.9 даны капитальные затраты при получении 1 км<sup>3</sup> дополнительных водных ресурсов различными техническими способами.

Таблица 6.9

**Капитальные затраты (млн. долларов)  
при получении 1 км<sup>3</sup> дополнительных водных ресурсов**

Способы получения дополнительной воды	Капитальные затраты
Регулирование речного стока водохранилищами	50 – 80
Территориальное перераспределение водных ресурсов	100 – 800
Использование ледников горных районов	50 – 100
Использование антарктических айсбергов	500 – 700
Очистка промышленных сточных вод	200 – 1500
Опреснение методом дистилляции	600 – 1600
Активные воздействия на облака	1 – 5

***Вопросы для самопроверки***

1. Что называется водохранилищем?
2. Каковы основные предпосылки создания водохранилищ?
3. Назовите типы водохранилищ по их генезису и их характерные черты?
4. Каковы основные параметры водохранилища, определяющие его размеры?
5. Основные виды регулирования стока водохранилищами, их сущность и применение.
6. В чем проявляются прямые воздействия водохранилищ на окружающую среду?
7. В чем заключаются косвенные воздействия водохранилищ на окружающую среду?
8. Как изменяется гидрологический режим водотока при регулировании речного стока водохранилищами?
9. Назовите основные направления и способы уменьшения неблагоприятных последствий создания водохранилищ.
10. Назовите другие технические способы увеличения располагаемых к использованию водных ресурсов.
11. В чем заключаются их положительные и отрицательные стороны?

## Глава 7. РАСЧЕТНАЯ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ

Многолетние и сезонные колебания объемов речного стока обуславливают неодинаковый приток воды к водозаборным и регулирующим сооружениям и неодинаковую водообеспеченность отраслей хозяйства в годы и сезоны разной водности. Изменить естественный режим речного стока, приспособив его к требованиям водопользователей, можно только путем регулирования стока водохранилищами. Однако при этом проблема изменчивости водоподдачи полностью не решается. Для полного регулирования речного стока потребовались бы огромные объемы водохранилищ, создание которых не может быть оправдано. Поэтому в современной практике водохозяйственного проектирования и эксплуатации водохранилища его отдачу обычно связывают с необходимой надежностью удовлетворения требований водопотребителей. Надежность водоотдачи характеризуется числом (процентом) лет или месяцев в многолетнем ряду с поддержанием заданного объема или расхода воды и называется *обеспеченностью водоотдачи*. В водном хозяйстве показателем надежности является гарантированная отдача водохранилища, под которой подразумевается минимальная среднесуточная, среднемесячная, среднесезонная или среднегодовая отдача, которая может быть предоставлена водопользователям с заданной расчетной обеспеченностью.

В зависимости от назначения гидроузла его гарантированная отдача может быть выражена, например, значением и обеспеченностью поступающего в нижний бьеф гидроузла расхода или объема воды для нужд водного транспорта, рыбного и сельского хозяйства и пр.; значением объема воды, забираемой из верхнего бьефа для орошения, водоснабжения и пр.; количеством гидравлической энергии или мощности, используемых в расчетных маловодных условиях для покрытия графика нагрузки энергосистемы. Соответственно гарантированная отдача обозначается  $Q_{\text{гар}}$ ,  $W_{\text{гар}}$ ,  $N_{\text{гар}}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{гар}}$ .

В комплексных гидроузлах гарантированная отдача выражается совокупностью указанных величин. Под *гарантированной отдачей каскада гидроузлов с водохранилищами*, расположенными на разных водотоках, подразумевается суммарный объем воды или

общее количество гидравлической энергии, получаемой от всех гидроузлов с заданной обеспеченностью. При этом роль каждого гидроузла с водохранилищем и взаимосвязь их режимов оптимизируется в целях достижения максимальной совокупной гарантированной отдачи всех гидроузлов:

$$\Sigma W_{\text{гар}} \rightarrow \text{макс или } \Sigma \mathcal{E}_{\text{гар}} \rightarrow \text{макс.}$$

Гарантированная водоотдача определяется физическими возможностями гидроузлов и водотоков, т.е. притоком воды обеспеченностью, соответствующей расчетной обеспеченности водоотдачи, и полезным объемом водохранилища первоочередного гидроузла или суммарным полезным объемом водохранилищ гидроузлов каскада или системы. Нарушение гарантированной водоотдачи называют *перебоями*. Под *расчетной обеспеченностью гарантированной водо- или энергоотдачи* понимают вероятность удовлетворения потребителей водой или энергией по соответствующей норме, измеряемую числом бесперебойных лет –  $p_n$ , бесперебойных периодов (месяцев, декад, суток) –  $p_n$  или числом часов бесперебойной подачи потребителю воды или энергии –  $p_o$ . При этом

$$p_n = \frac{m}{(n+1)};$$

$$p_n = \frac{m}{n};$$

$$p_o = (W_{\text{гар}} - \overline{\Delta d}) / W_{\text{гар}} = (N_{\text{гар}} - \overline{\Delta d}) / N_{\text{гар}}.$$

Здесь  $m$  – число бесперебойных лет или периодов;  $n$  – общее число членов ряда;  $N_{\text{гар}}$  – гарантированная мощность ГЭС;  $W_{\text{гар}}$  – гарантированная водоотдача гидроузла;  $\Delta d$  – средний многолетний дефицит энерго- или водоотдачи. Четкой связи между показателями обеспеченности нет, однако можно указать, что  $p_n < p_n < p_o$ . Так, для примера в табл. 7.1 показана связь между характеристиками надежности (обеспеченности) водоотдачи за длительный период для водохранилищ Вазузской гидротехнической системы (ВГС), расположенной в бассейне верхнего течения р. Волги, и Москворецкой водной системы (МВС), расположенной в бассейне р. Москвы.

Таблица 7.1

## Характеристики обеспеченности водоотдачи

Система водохранилищ	Обеспеченность, %		
	по числу лет	по числу месяцев	по объему
ВГС	96,7	98,5	99,3
МВС	96,7	98,8	99,5

Обычно расчетная обеспеченность определяется выраженным в процентах числом бесперебойных лет. Это наиболее понятный и достаточно гибкий критерий надежности водоотдачи. Правильное в принципе положение об экономическом обосновании обеспеченности в каждом отдельном случае не освоено практикой и требует дополнительных методических разработок.

Изменение расчетной обеспеченности приводит, при прочих равных параметрах, к существенным изменениям гарантированной водоотдачи. При этом, чем выше обеспеченность, тем ниже гарантированная водоотдача. В качестве примера в табл. 7.2 приведены данные об относительном изменении гарантированной водоотдачи в зависимости от принятой расчетной обеспеченности для одной из рек России, полученные расчетом регулирования стока по наблюдаемому гидрологическому ряду при различных относительных объемах водохранилища. Переходя, например, от расчетной обеспеченности водоотдачи 99% к 95%-й при объеме водохранилища  $\beta = 0,15$ , можно получить приращение отдачи более чем на 20%.

Таблица 7.2

## Значения гарантированной водоотдачи в зависимости от принятой расчетной обеспеченности и объема водохранилища

Обеспеченность, %	$\beta = V_{\text{нп}} / W_i$					
	0,05			0,15		
99	1			1		
95	1,30	1		1,21	1	
90	1,37	1,06		1,29	1,06	
75	1,65	1,26	1,20	1	1,49	1,23
50	1,90	1,46	1,39	1,15	1	1,68
						1,39
						1,30
						1,12

Для удовлетворения совместных требований различных водопользователей устанавливается так называемая *приведенная обеспеченность* гарантированной отдачи  $p'$ , которая учитывает значения и обеспеченность нормальной и урезанной водоотдачи. Приведенная

обеспеченность может определяться по формуле С.Н. Крицкого и М.Ф. Мешкеля:

$$p' = p_1 + (p_2 - p_1)\alpha_2 / \alpha_1,$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – обеспеченности, соответственно, нормальной  $\alpha_1$  и урезанной  $\alpha_2$  водоотдачи ( $\alpha$  – гарантированный расход в долях среднегодового расхода за многолетие или коэффициент регулирования). Так, например, при обеспеченности  $p_1 = 75\%$  и снижении ее в диапазоне 75 – 95% на 20%, т.е. при  $\alpha_2 = 0,8\alpha_1$  приведенная обеспеченность гарантированной водоотдачи составит  $p' = 75\% + 0,8(95\% - 75\%) = 91\%$ . Аналогично  $p'$  определяется при трехступенчатом плане использования водных ресурсов водохранилища:

$$p' = p_1 + (p_2 - p_1)\alpha_2 / \alpha_1 + (p_3 - p_2)\alpha_3 / \alpha_2.$$

Очевидно, переход к высокой приведенной обеспеченности водоотдачи, что соответствует меньшему снижению нормальной водоотдачи в перебойные годы, приведет к увеличению многолетней составляющей полезного объема водохранилища и, соответственно, к увеличению его полного объема.

#### ***Вопросы для самопроверки***

1. Как понимаете обеспеченность водоотдачи из водохранилищ?
2. Как связаны между собой понятия «расчетная обеспеченность» и «гарантированная отдача»?
3. Что такое приведенная обеспеченность?

## Глава 8. РАСЧЕТЫ СЕЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩАМИ

### 8.1. Исходные данные для проведения расчетов регулирования стока

Исходными данными для проведения регулирования стока водохранилищами с целью определения основных параметров и режимных характеристик гидроузлов являются материалы гидрологических наблюдений (подробно изложенные в гл. 3), топографическая характеристика водохранилищ, гидрогеологические и другие материалы, а также информация о возможных потерях воды из водохранилищ.

**Топографические характеристики водохранилищ.** Основной топографической характеристикой водохранилища являются кривые зависимости площадей зеркала ( $F$ ) и объемов ( $V$ ) от подпорного уровня (наполнения водохранилища). Для расчета этих характеристик необходимо иметь, как правило, топографические карты в масштабе 1:25 000 или 1:10 000.

Площади зеркала водохранилища при тех или иных положениях подпорного уровня определяются путем планиметрирования на картах площадей, ограниченных контурами горизонталей и линией продольной оси подпорного сооружения, замыкающей горизонтали с обоих берегов. Для построения зависимости площадей зеркала от уровней необходимо провести планиметрирование на картах площадей при всех горизонталях в пределах от начального уровня  $Z_0$  (уреза воды) до возможного подпорного уровня –  $Z_n$ .

Пусть в пределах намечаемого подпора – до  $Z_n$  получен ряд значений площадей зеркала  $F_1, F_2, \dots, F_n$ . Соединив эти точки прямой, можно построить зависимость  $F = f(Z)$ , изображенную в виде ломаной линии на рис. 8.1.

Ординаты кривой  $V = f(Z)$  для любой отметки  $Z$  рассчитываются путем последовательного суммирования от  $Z_0$  элементарных объемов  $\Delta V_i$ , определяемых по выражению

$$\Delta V_i = \frac{1}{3} (F_i + \sqrt{F_i F_{i+1}} + F_{i+1}) \Delta Z,$$

или при малом  $\Delta Z$

$$\Delta V_i = \frac{1}{2} (F_i + F_{i+1}) \Delta Z,$$

$$\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$$

Расчет топографических характеристик водохранилища удобно вести по форме табл. 8.1.

Таблица 8.1

Расчет топографических характеристик водохранилища						
Уровень воды $Z$ , м	Площадь зеркала воды $F$ , км <sup>2</sup>	$\frac{F_i + F_{i+1}}{2}$ , км <sup>2</sup>	$F_i + F_{i+1} + F_{i+1}^3$ , км <sup>2</sup>	Высота слоя воды $\Delta Z$ , м	Объем слоя воды $\Delta V_i$ , км <sup>3</sup>	Объем водохранилища $V = \sum \Delta V_i$ , км <sup>3</sup>
15	175					0
20	575	375	356	5	1,78	1,78
25	1260	918	895	5	4,48	6,26
30	2380	1820	1790	5	8,95	15,21
35	3420	2900	2880	5	14,4	29,61
40	4800	4110	4090	5	20,4	50,01
45	6640	5720	5700	5	28,5	78,51
50	9300	7970	7930	5	39,6	118,1
55	11800	10550	10530	5	52,6	170,1

где  $\Delta V_i$  – элементарный объем водохранилища между горизонталями  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$ ;  $F_i$  и  $F_{i+1}$  – площади зеркала водохранилища соответственно при уровнях  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$ ;

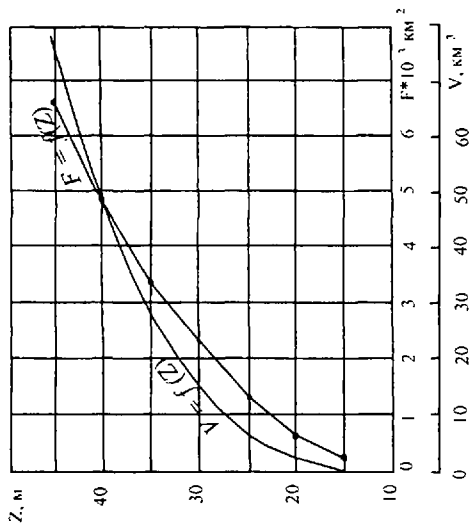


Рис. 8.1. Кривые площадей зеркала ( $F$ ) и статических объемов ( $V$ ) водохранилища.

Из табл. 8.1 видно, что средние площади, подсчитанные по приведенным выражениям, при небольшом шаге по высоте различаются незначительно. Объемы водохранилища в таблице подсчитаны по первому выражению. По второму выражению полный объем водохранилища при уровне 55 м составил 171,8 км<sup>3</sup>, т.е. разница составила около 1,0%.

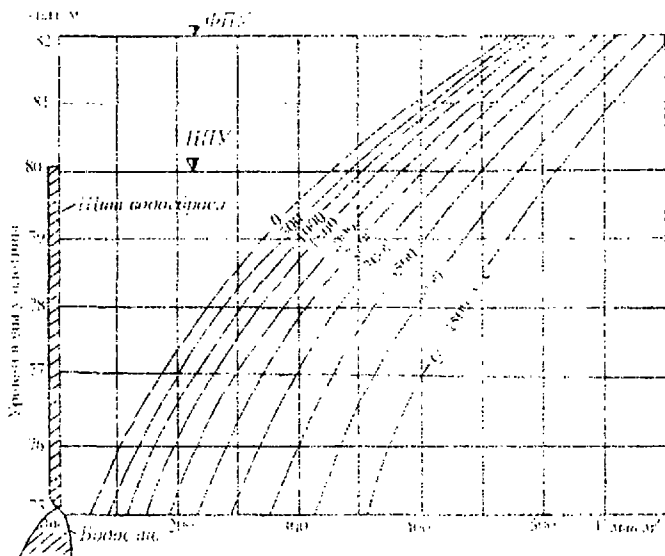


Рис. 8.2. Кривые динамических объемов водохранилища.

По данным таблицы строят зависимости  $F = f(Z)$  и  $V = f(Z)$  (см. рис. 8.1). Форма кривой  $F = f(Z)$  определяется конфигурацией долины и может иметь неправильное очертание. Зависимость  $V = f(Z)$  выражается плавной выпуклой кривой параболического вида.

Так как кривая  $V = f(Z)$  рассчитана для условий горизонтальности уровня водохранилища, т.е. отвечает гидростатическому равновесию неподвижной жидкости, она носит название *статической кривой объемов водохранилища*.

Для неглубоких и протяженных водохранилищ среднего и небольшого объема негоризонтальность их водной поверхности весьма значительна. В этом случае расчеты необходимо производить по динамическим кривым объемов, вид которых дан на рис. 8.2.

**Гидрогеологические и другие материалы.** С точки зрения непосредственного водохозяйственного проектирования, геологические и гидрогеологические материалы необходимы, главным образом, для установления фильтрационных потерь из водохранилищ в процессе их нормальной эксплуатации, а также для оценки затрат на насыщение грунтов ложа и бортов водохранилища при первоначальном наполнении до уровня мертвого объема и в пределах полезного объема. Для решения этих задач полевыми исследованиями должно быть установлено геологическое строение долины, получены данные о скважности слагающих ее горных пород, о планово-высотном положении существующего зеркала грунтовых вод. Для наблюдения за изменением уровня грунтовых вод при первоначальном наполнении и в процессе нормальной эксплуатации водохранилища целесообразно иметь сеть гидрогеологических створов, что позволит в совокупности с другими упомянутыми данными определить объемы воды, постоянно и временно аккумулируемые в толще грунтов прибрежной полосы водохранилища.

Геологические и гидрогеологические данные необходимы и при расчетах процессов переработки берегов водохранилищ и русловых процессов ниже гидроузла.

Для водохозяйственного проектирования необходимы также данные метеорологических наблюдений, данные исследований русловых процессов, сведения о хозяйственной деятельности на водосборе и в русле реки, сведения о водопользовании в современных условиях и на перспективу. Сведения об осадках используются для восстановления пропуска в рядах данных по стоку, для экстремальных расходов воды на основании сведений о максимальной интенсивности дождевого стока. Большую ценность представляют собой данные по испарению, влажности воздуха и скорости ветра, которые используются для расчетов потерь на испарение при создании водохранилищ, а также высоты волны на водохранилищах. При расчетах временных потерь на ледообразование в зимний период необходимы сведения о высоте снежного покрова и толщине льда на водохранилищах. Необходима и информация о водопотреблении. Она чрезвычайно разнородна и в общем случае по форме задания может быть подразделена на две большие категории: 1) информация, заданная в виде постоянного, не меняющегося от года к году, объема с его распределением по расчетным интервалам внутри го-

да; 2) информация, изменяющаяся от года к году в зависимости от определенных гидрологических, метеорологических и других характеристик конкретного года.

К информации первой категории относятся, в первую очередь, промышленное и хозяйственно-питьевое водопотребление, а также обязательные санитарные попуски в нижние бьефы гидроузлов. Эти водопотребители имеют высокий норматив обеспеченности (> 90%), и его ограничение допускается только в экстремально маловодных условиях и при пустом водохранилище; в этих условиях для поддержания водоподдачи в минимально допустимом объеме иногда разрешается сработка водохранилища ниже УМО до так называемого *уровня предельно допустимой сработки*.

Из второй категории представляется целесообразным рассмотреть водопотребление орошаемого земледелия и экологические попуски в нижние бьефы.

Особенностью оросительного водопотребления считается то, что оросительная норма существенно изменяется в зависимости от метеорологических условий конкретного года. Эти изменения случайного характера и поэтому в общем случае должны быть описаны так же, как и сток, кривой обеспеченности. В практике проектирования обычно пользуются ступенчатой аппроксимацией указанной кривой с числом ступеней не более пяти. Таким образом, можно выделить пять градаций года по метеорологическим условиям: крайне засушливые, засушливые, средние, влажные, крайне влажные.

Вопрос экологических попусков в нижние бьефы гидроузлов относительно новый и весьма проблематичный (см. п. 5.2), и в настоящее время какого-то однозначного подхода к нему нет, особенно в период половодья.

**Потери воды из водохранилищ.** В водохозяйственных расчетах учитываются потери воды на испарение, фильтрацию и шлюзование. В некоторых случаях подлежат учету и потери воды на ледообразование.

Вода, расходуемая на испарение, теряется для данного водохранилища. Вода, фильтрующаяся в нижний бьеф, теряется лишь для потребителей, использующих воду из водохранилища. Потери на испарение с водной поверхности водохранилищ представляют собой дополнительное испарение по сравнению с таковым для незатопленной поверхности, т.е. с поверхности суши, и задаются в виде

суммарного слоя испарения за год с распределением по месяцам. Слой дополнительного испарения физически представляет собой разность между естественным стоком с намечаемой к затоплению суши  $h_c$  и стоком с зеркала водохранилища  $h_n$ . При этом  $h_n$  определяется разностью между осадками  $P$ , выпавшими на водное зеркало, и испарением с водной поверхности  $E_n$ , т.е.  $h_n = P - E_n$ . Таким образом, слой дополнительного испарения  $E_d = h_c - h_n$ .

Подставив вместо  $h_n$  его значение  $(P - E_n)$  и сделав некоторую перестановку, получим

$$E_d = h_c - (P - E_n) = E_n - (P - h_c).$$

В среднем за многолетие разность  $P - h_c$  равна испарению с поверхности суши, намечаемой к затоплению,  $-E_c$ . Тогда формула для нахождения слоя дополнительного испарения примет вид:

$$E_d = E_n - E_c.$$

Иногда стоком  $h_c$  пренебрегают и определяют слой дополнительного испарения с некоторым запасом:

$$E_d = E_n - P.$$

Все величины в формулах выражаются в миллиметрах слоя. Средний за интервал времени  $\Delta t_i$  расход потерь воды на дополнительное испарение  $\overline{Q_n}(t)$  — в  $\text{м}^3/\text{с}$ :

$$\overline{Q_n} = E_{дв} \overline{F_i} / (1000 \Delta t_i).$$

Здесь  $\overline{Q_n}$  — расход потерь воды на дополнительное испарение за  $\Delta t_i$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $E_{дв}$  — слой потерь на дополнительное испарение в течение расчетного интервала времени  $\Delta t_i$ , мм;  $\overline{F_i}$  — средняя площадь водохранилища,  $\text{м}^2$ ; 1000 — число для перевода слоя из миллиметров в метры. В общем случае  $\overline{F_i}$  представляет собой разность площадей водного зеркала после постройки водохранилища  $\overline{F_{вi}}$  и до постройки  $\overline{F_{сi}}$ :

$$\overline{F_i} = \overline{F_{вi}} - \overline{F_{сi}}.$$

Так как величина  $F_{сi}$  относительно мала, то в проектных расчетах ее принимают равной нулю, а  $F_i$  определяют по зависимости

$F = F_b = f(Z)$  при уровне, отвечающем среднему наполнению водохранилища за расчетный интервал времени  $\Delta t_i$  в секундах: декаду, месяц (при расчете регулирования по календарному гидрологическому ряду) или сезон, год (при расчетах регулирования обобщенными методами).

В последние годы в практике водохозяйственных расчетов принято задавать информацию о  $E_b$ ,  $E_c$  и, соответственно, о  $E_d$  для трех характерных по общей увлажненности категорий лет – влажного, среднего и засушливого.

Потери на испарение рассчитываются, как правило, для периода открытого русла.

Для некоторых водохранилищ России среднегодовой объем дополнительных потерь на испарение приведен в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Дополнительные потери воды на испарение

Водохранилище	Река	Средний годовой сток в створе гидроузла, км <sup>3</sup>	Средняя площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Дополнительные потери на испарение	
				км <sup>3</sup>	% от стока
Волгоградское	Волга	254	3500	1,75	0,7
Цимлянское	Дон	23,1	2320	1,60	7,0
Камское	Кама	53,8	1570	0,15	0,0

В целом потери на дополнительное испарение изменяются в широком диапазоне – от 0 для северных районов до 10% среднего многолетнего стока реки для южных районов.

При создании водохранилищ в узковедомственных целях (например, для орошения) при расчете потерь на дополнительное испарение с водной поверхности водохранилищ сезонного регулирования стока принимается возможный случай сочетания по климатическим условиям (разность высокого испарения с водной поверхности  $p = 25\%$  и небольшого испарения с суши  $p = 75\%$ , отвечающего расчетной обеспеченности орошения). Для водохранилищ многолетнего регулирования стока расчет потерь в этом случае производится по средним многолетним данным.

Расход воды на фильтрацию из верхнего в нижний бьеф через гидротехнические сооружения и в обход их, а также разного рода протечки через неплотности закрытых затворов водосбросных отверстий и неработающих турбин определяются по эмпирическим за-

висимостям, известным из гидравлики. В основном  $Q_{\phi}$  – это фильтрация через земляные плотины. Так, на Камской ГЭС  $Q_{\phi} = 15 \text{ м}^3/\text{с}$ , на Цимлянкой ГЭС  $Q_{\phi} = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ , а на Саратовской –  $Q_{\phi} = 70 \text{ м}^3/\text{с}$ . В то же время для Красноярской бетонной плотины  $Q_{\phi} = 6 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Потери воды на фильтрацию принимаются, как правило, по аналогам постоянными в течение всего года и от года к году обычно не меняются.

На судоходных реках в составе гидроузлов предусматриваются шлюзы. В этих условиях необходимо учитывать потери воды на шлюзование  $Q_{\text{шл}}$ . Средний расход потерь воды на шлюзование  $Q_{\text{шл}}$  за интервал времени  $\Delta t$  определяется по заданному числу шлюзований  $m$ , площади водной поверхности одной шлюзовой камеры  $S$  и режиму уровней бьефов (для однониточного и однокамерного шлюза). В этом случае, приняв в расчете средние отметки бьефов, можно найти  $Q_{\text{шл}}(t)$  по формуле

$$Q_{\text{шл}} = mS(\overline{Z_{\text{в.б}}} - \overline{Z_{\text{н.б}}})/\Delta t,$$

где  $Q_{\text{шл}}$  – потери на шлюзование,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S$  – в квадратных метрах,  $\overline{Z_{\text{в.б}}}$  и  $\overline{Z_{\text{н.б}}}$  – в метрах,  $\Delta t$  – в секундах.

Потери воды на шлюзование учитываются только в навигационный период.

*Потери на ледообразование* представляют собой количество льда, осевшего на берегах водохранилища во время зимней сработки. Эти потери при заданной морфометрии чаши водохранилища определяются климатическими характеристиками зимы, обуславливающими толщину льда. В практике проектирования эта информация задается в виде распределения толщи льда по месяцам для трех категорий зимы – теплой, средней, холодной. Весной в процессе таяния льда зафиксированные потери возвращаются в водохранилище, т.е. добавляются к притоку в водохранилище, обычно в первую-вторую декады в начале половодья. Отсюда и двузначность потерь воды на ледообразование.

Если водохранилище не срабатывается, то при образовании льда режим уровней не изменяется. Объясняется это вытеснением, плавающим льдом слоя воды, равного его массе.

Объем воды  $\Delta W_n$ , подлежащий исключению из зимнего притока, можно определить по выражению:

$$\Delta W_n = h\gamma(F_n - F_k),$$

где  $h$  – средняя толщина ледяного покрова водохранилища,  $\gamma$  – плотность льда,  $F_n$  и  $F_k$  – начальная (в момент образования ледостава) и конечная (в момент окончания зимней сработки) площади зеркала водохранилища.

Величина  $\Delta W_n$  условно называется *временной потерей на ледообразование*.

Для больших водохранилищ значительную роль в их водном балансе играют снеговые осадки, выпадающие на ледяной покров. Для средних и небольших водохранилищ ими можно пренебречь. Благодаря вытеснению из водохранилища своей массой равновеликого объема воды эти осадки сразу же обращаются в сток. Таким образом, на водный баланс водохранилища снеговые осадки оказывают противоположное с потерями на ледообразование влияние: зимой увеличивают приток, а весной – его уменьшают. Если испарение рассчитывается только для периода открытого русла и, следовательно, осадки за зимние месяцы не принимаются во внимание, в водохозяйственных расчетах необходимо учитывать результирующую величину:

$$\text{зимой } \Delta W_s = \Delta W_n - \Delta W_c;$$

$$\text{весной } \Delta W_b = -\Delta W_n + \Delta W_c;$$

где  $\Delta W_c = h_c F_k$ . Здесь  $\Delta W_c$  – объем «снегового притока»,  $h_c$  – слой воды в снеговых осадках,  $F_k$  – площадь ледяного покрова в конце зимней сработки водохранилища.

Если же расчет потерь на испарение ведется за весь год, снеговой приток оказывается уже учтенным и повторному учету не подлежит.

Потери воды на ледообразование подлежат учету при сезонном регулировании, т.е. когда водохранилище ежегодно срабатывается до УМО. При многолетнем же регулировании в большинстве лет водохранилище к концу зимы срабатывается лишь частично, и по-

этому объем потерь может быть заимствован из оставшегося, переходящего на будущий водохозяйственный год, запаса воды водохранилища до восстановления его весной. Положение, аналогичное сезонному регулированию, создается в последний год критического маловодья, когда к концу зимы этого года водохранилище срабатывается полностью – до УМО. В этом случае потери на ледообразование (и снеговой приток) также подлежат учету в водохозяйственных расчетах.

Средний за интервал времени  $\Delta t$  расход потерь воды на ледообразование  $Q_n(t)$  (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) может быть определен по выражению:

$$Q_n(t) = (\Delta W_n - \Delta W_c) / \Delta t.$$

Потери воды на ледообразование (за вычетом зимних осадков) относятся к периоду зимней сработки водохранилища, а возврат воды происходит в первом весеннем месяце.

При многолетнем регулировании потери воды на ледообразование вводятся, как отмечалось выше, в последнем году сработки водохранилища. При этом  $\Delta t$  в формуле будет соответствовать периоду сработки водохранилища.

## **8.2. Использование интегральных кривых для расчета сезонного регулирования стока**

Сущность всех расчетных приемов регулирования стока заключается в сопоставлении графиков притока и потребления воды в створе рассчитываемого водохранилища. Такое сопоставление производится методом интегральных кривых в табличной и графической модификациях. Метод интегральных кривых позволяет учесть все особенности в ходе гидрографов притока и потребления во времени, в частности внутригодовую и многолетнюю изменчивость речного стока, а также внутривидные корреляционные связи.

Интегральные кривые – это графическое изображение хронологической последовательности стока или потребления в нарастающем виде, используются как один из приемов расчета регулирования стока. Этот прием выгодно отличается иллюстративным преимуществом, что имеет важное значение для ознакомления с сущностью регулирования стока и прослеживания этого процесса. Кроме того, прием широко используется для решения многовариантных задач регулирования стока на начальных стадиях проектирования.

Прежде всего, необходимо произвести расчет и построение интегральной кривой стока в створе проектируемого гидроузла. Техника построения интегральных кривых стока подробно изложена в учебнике [8].

Фрагмент разностной интегральной кривой стока в створе Красноярской ГЭС на р. Енисее показан на рис. 8.3.

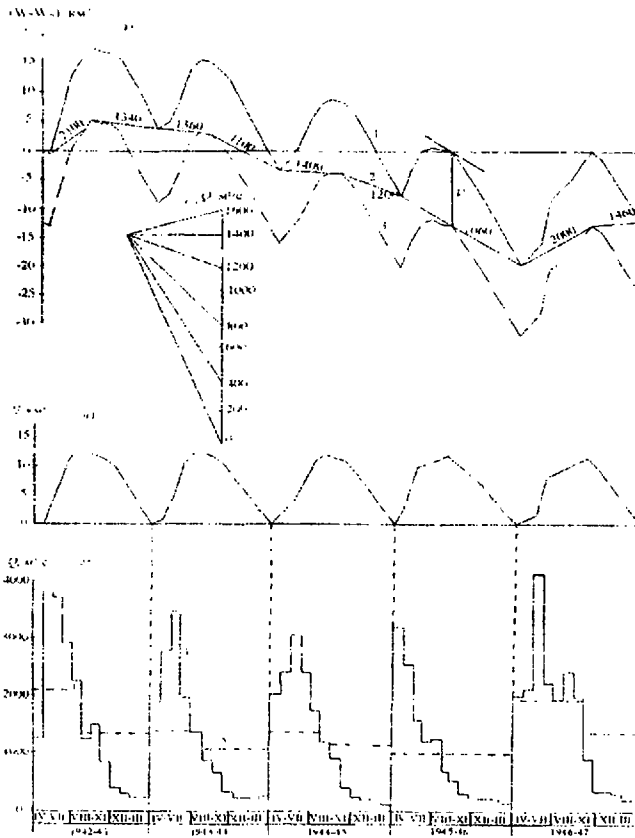


Рис. 8.3. Расчеты сезонного регулирования по интегральной кривой стока.  
*a* – интегральные кривые стока: естественного (1), зарегулированного (2) и контрольная (3); *б* – лучевой масштаб; *в* – график наполнения водохранилища; *г* – графики расходов воды: естественных (4) и зарегулированных (5).

Использование интегральных кривых для расчета регулирования стока основано на следующем уравнении водного баланса водохранилища за период его работы между моментами  $t_1$  и  $t_2$ :

$$V_{t_2} = V_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} (Q_{\text{пр}} - Q) dt = V_{t_1} + \int_{t_1}^{t_2} Q_{\text{пр}} dt - \int_{t_1}^{t_2} Q dt. \quad (8.1)$$

Здесь  $V_{t_1}$  – запас воды в водохранилище в начальный момент  $t_1$ ;  $V_{t_2}$  – запас воды в конце периода  $t_2$ ;  $Q_{\text{пр}}$  и  $Q$  – соответственно, приток в водохранилище и расход воды из него.

Понятно, что первый интеграл выражает приращение объема притока за период  $t_1 - t_2$ , а второй – приращение объема расходоуемой воды. Это значит, что разности ординат интегральных кривых притока и потребления дают объем наполнения или сработки водохранилища в любой момент времени.

При равенстве  $Q_{\text{пр}}$  и  $Q$  в какой-то период первый интеграл равен второму и, следовательно, наполнение водохранилища за период остается неизменным. Исходя из этого, линия, параллельная интегральной кривой притока и отстоящая от нее на некотором расстоянии, характеризует неизменное наполнение водохранилища. Если это расстояние в масштабе шкалы объемов  $m_v$  принять равным  $V_{\text{полезн}}$ , то верхняя линия будет соответствовать интегральной кривой пустого водохранилища, а нижняя – полного. Интегральная кривая зарегулированного расхода при этом, т.е. полного расхода брутто (включая полезное потребление, холостые сбросы и потери), пройдет в зоне, ограниченной этими двумя линиями, направляясь то к верхней, если приток меньше потребления, то к нижней, если приток больше потребления. При равенстве этих расходов линия зарегулированного стока совпадает либо с нижней линией, что означает избыток притока, сбрасываемого вхолостую, либо с верхней, что означает перебой в отдаче.

По интегральным кривым можно решать не только основные задачи (для заданного гарантированного расхода или графика водопользования определять необходимый для его поддержания полезный объем водохранилища, или наоборот – при заданном полезном объеме определять гарантированный расход), но и определять характеристики зарегулированного режима: уровни или наполнение водохранилища, зарегулированные расходы.

Для решения поставленных задач необходимо провести регулирование стока по имеющемуся гидрологическому ряду или расчетному периоду.

Практически расчеты регулирования стока при заданном полезном объеме водохранилища ведутся с помощью двух интегральных кривых, совмещенных на одном чертеже (см. рис. 8.3): исходной 1, отвечающей сработанному полезному объему, и контрольной 3, строящейся параллельно и ниже исходной на расстоянии (по вертикали), равном заданному полезному объему (в масштабе  $m_n$ ), отвечающей полному водохранилищу.

Построив контрольную интегральную кривую, определим зарегулированные расходы воды в период сработки водохранилища. Для этого по годам расчетного периода проведем касательные к точке начала межени нижней интегральной кривой и к точке конца межени верхней интегральной кривой, т.е. проведем линию расходов от заполненного водохранилища к пустому. По наклону касательных снимем с лучевого масштаба значения зарегулированных расходов в период сработки водохранилища. В качестве гарантированного принимается расход, определенный по году с объемом межени, близким к расчетному (с обеспеченностью  $p$ ), либо с порядковым номером (в ряду уменьшения расходов)  $m = p(n + 1)$ . Заполнение полезного объема водохранилища производится при следующих зарегулированных расходах: в годы повышенной водности для уменьшения объема холостых сбросов – при зарегулированных расходах, равных расходу полной производительности (пропускной способности) гидроузла  $Q_b$ ; в годы пониженной водности он снижается до расхода, при котором обеспечивается заполнение полезного объема (путем проведения касательных к точке конца межени верхней кривой и к точке конца половодья нижней кривой и определения значения расхода по наклону их с лучевого масштаба). В рассматриваемом случае  $Q_b = 2100 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В многоводные годы при регулировании расхода  $Q_b$  заполнение полезного объема водохранилища произойдет до окончания половодья. В такие годы в период от конца наполнения до начала сработки водохранилища установка будет работать на приточных расходах, иногда превышающих  $Q_b$ , осуществляя в это время холостые сбросы.

Момент окончания наполнения водохранилища, как правило, не будет совпадать с границей месяцев, и потому переход от заре-

гулированных расходов, равных  $Q_v$ , к приточным окажется внутри месяцев, что следует иметь в виду при расчетах (см. рис. 8.3).

Результаты проведенных расчетов регулирования по интегральной кривой приводятся на хронологических графиках (под чертежом интегральных кривых): а) хода наполнения – сработки водохранилища (в масштабе объемов для интегральной кривой) и б) естественных и зарегулированных расходов.

Графики наполнений – сработки водохранилища представляют собой плавную линию, построенную по наполнениям на конец – начало расчетных интервалов (месяцев), взятых с интегральных кривых как вертикальные расстояния (в масштабе объемов) между линией пустого водохранилища и линией зарегулирования расходов, местами совпадающей с линией полного водохранилища; графики расходов – ступенчатые. На указанных графиках, характеризующих режим работы водохранилища, дополнительно фиксируется момент окончания заполнения полезного объема, если этот момент не совпадает с границами месяцев. Расчеты регулирования по интегральным кривым на жестко заданный ступенчатый график расходов ведутся совершенно одинаково и в той же последовательности, как это было показано для случая регулирования на постоянный расход. В этом случае линия зарегулированных расходов будет ломаной с изменением расходов на границах, соответствующих, например, началу – концу навигационного или зимнего времени.

Для количественной оценки характеристик зарегулированного режима рассчитываются и строятся кривые продолжительности наполнений водохранилища, естественных и зарегулированных расходов. Объем срезки на последних (площадь со знаком минус) должен соответствовать объему повышения стока (площадь со знаком плюс). Расходы, определяемые по интегральным кривым, соответствуют расходам брутто. Поэтому при дальнейшем их использовании необходимо вычесть из них потери стока.

### **8.3. Обобщенные методы расчета сезонного регулирования стока**

Обобщенные методы расчета сезонного регулирования стока широко используются на предпроектных стадиях в случае отсутствия или недостаточности непосредственных наблюдений за стоком, а также для экспертной оценки основных параметров водохранилищ гидроузлов.

В обобщенных методах основные параметры стока и регулирования задаются в относительных единицах:

– годовой сток в виде модульного коэффициента годового стока расчетной обеспеченности  $K_{гр} = Q_{гр} / \overline{Q}_r$ ; где  $Q_{гр}$  – годовой сток расчетной обеспеченности,  $\overline{Q}_r$  – среднегодовой расход воды за многолетие;

– гарантированная водоотдача из водохранилища ( $Q_{гар}$ ) в виде коэффициента регулирования  $\alpha = Q_{гар} / \overline{Q}_r$ ;

– сток межени расчетной обеспеченности в виде модульного коэффициента стока межени расчетной обеспеченности  $K_{мр} = Q_{мр} / \overline{Q}_m$ , где  $Q_{мр}$  – сток межени расчетной обеспеченности,  $\overline{Q}_m$  – средний сток за межень, или норма меженного стока;

– полезный объем водохранилища сезонного регулирования в виде коэффициента полезного объема  $\beta_{сез} = V_{сез} / \overline{W}_r$ , где  $V_{сез}$  – полезный объем водохранилища сезонного регулирования,  $\overline{W}_r$  – средний многолетний объем годового стока ( $\overline{W}_r = \overline{Q}_r \cdot 31,5 \cdot 10^6$ , произведение нормы годового стока на среднее число секунд в году).

При сезонном регулировании стока полезный объем водохранилища является единственным источником покрытия дефицита стока маловодного года. Поэтому обеспеченность стока межени, режим которой при заданном режиме водопользования определяет собой в этом случае полезный объем водохранилища, должна соответствовать расчетной обеспеченности водоотдачи.

В практике проектирования для постоянной в течение года водоотдачи  $\alpha$  потребный полезный объем водохранилища рекомендуется определять по следующей простейшей формуле:

$$\beta_{сез} = \alpha t_m - \overline{m}_m K_{мр}, \quad (8.2)$$

где  $t_m$  – длительность межени в долях года;  $\overline{m}_m$  – средняя многолетняя доля межени в годовом стоке;  $K_{мр}$  – модульный коэффициент стока межени расчетной обеспеченности.

Для определения объема водохранилища по приведенной формуле необходимо предварительно произвести статистическую обработку имеющегося ряда гидрологических наблюдений и получить параметры годового и меженного стока (норму стока, коэффициенты вариации и асимметрии –  $C_v$  и  $C_r$ ).

Для расчета параметров меженного стока ( $\bar{Q}_m, C_{vm}, C_{sm}$ ) сроки межени следует назначать жесткими (едиными для всех лет и общими для всех водотоков района) с округлением их до целого месяца.

При сравнительно небольшой разнице между коэффициентами вариации годового и меженного стока ( $C_{vг} \cong C_{vm}$ ) может быть использована формула

$$\beta_{сет} = \alpha t_m - \bar{m}_m K_{гр}. \quad (8.3)$$

Формулы (8.2) и (8.3) удовлетворяют и случаю перехода от сезонного регулирования к многолетнему (при  $\alpha = K_{гр}$ ). Неравномерность водоотдачи внутри года (энергетика, навигация, орошение) можно приближенно учесть коэффициентом  $a$  ( $a = \alpha_m / \alpha$ , где  $\alpha_m$  – водоотдача в межень,  $\alpha$  – среднегодовая водоотдача). Тогда формула, например (8.2), примет вид

$$\beta_{сез} = \alpha a t_m - \bar{m}_m K_{гр}. \quad (8.4)$$

При  $a > 1$   $\beta_{сет}$  возрастает, а при  $a < 1$  – уменьшается по отношению к  $\alpha$ , т.е. к постоянной водоотдаче в течение года.

Точность расчета полезного объема водохранилища по приведенным формулам зависит от точности подсчета статистических параметров годового и меженного стока, а также точности определения  $t_m$  и  $\bar{m}_m$ . Длительность в долях от года ( $t_m$ ) и доля меженного стока от годового ( $\bar{m}_m$ ) рассчитываются по среднемесячным расходам воды в среднем за многолетний период. Естественно, они могут отклоняться от соответствующих, подсчитанных в маловодные годы.

Абсолютные значения полезного объема водохранилища сезонного регулирования составят:

$$V_{полезн} = \beta_{сез} \bar{W}_г,$$

где  $\bar{W}_г$  – средний многолетний объем годового стока.

Наиболее обоснованным и точным методом расчета полезного объема водохранилища сезонного регулирования стока является балансовый метод расчета по длинному ряду стоковых наблюдений. При расчетах по этому методу для каждого года табличным способом определяется суммарный объем дефицита стока межени –  $\Sigma W_{деф}$  до заданного гарантированного расхода водоотдачи –  $Q_{гар}$ , численно равный полезному объему водохранилища. Полученные

для каждого года  $\Sigma W_{\text{дефи}}$  ранжируют в возрастающем порядке и производят подсчет их эмпирической обеспеченности по формуле  $p = m/(n + 1)$ , где  $m$  – порядковый номер  $\Sigma W_{\text{дефи}}$ , а  $n$  – длина ряда. В качестве расчетного значения полезного объема водохранилища принимается максимальный дефицит стока межени заданной обеспеченности.

Следует заметить, что постоянная в течение года гарантированная водоотдача возможна для узковедомственных водохранилищ. Для водохранилищ комплексного назначения гарантированная водоотдача задается в виде графика водопользования. Например, в период с мая по октябрь включительно  $Q_{\text{гар}} = 2550 \text{ м}^3/\text{с}$ , удовлетворяя при этом требования навигации, а в остальной период (XI–IV) –  $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для этого случая суммарные объемы стока межени рассчитываются до  $Q_{\text{гар}} = 1500 \text{ м}^3/\text{с}$  в период с апреля по ноябрь (с конца межени), а с октября и далее по отношению к  $2500 \text{ м}^3/\text{с}$ . Рассчитанные таким способом дефициты стока межени по годам длительного периода относятся к среднегодовому значению водоотдачи, т.е. в данном случае:  $Q_{\text{гар}} = \frac{2550 \cdot 6 + 1500 \cdot 6}{12} = 2025 \text{ м}^3/\text{с}$ , или от-

носительному коэффициенту  $\alpha = Q_{\text{гар}} / \bar{Q}_r$ .

Рассматриваемый метод, хотя и является эффективным, тем не менее и ему присущи определенные погрешности, вызванные недостаточной длительностью ряда. Эти погрешности тем больше, чем короче ряд наблюдений.

Ниже приводится сравнение результатов расчетов полезного объема водохранилища сезонного регулирования стока различными методами (на примере одного из Сибирских водохранилищ).

Исходные данные (с индексом  $г$  – для года и  $м$  – для межени):

$$\bar{Q}_r = 2800 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \bar{W}_r = 88,2 \text{ км}^3, \quad C_{vr} = 0,15; \quad C_{sr} = 0,30.$$

$$\bar{Q}_m = 960 \text{ м}^3/\text{с}, \quad \bar{W}_m = 17,7 \text{ км}^3, \quad C_{vm} = 0,21; \quad C_{sm} = 0,42.$$

$$\alpha = K_{rp} = 0,784; \quad Q_{\text{гар}} = \alpha * \bar{Q}_r = 2195 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Длительность межени в среднем за многолетие 7 месяцев.

Для обеспечения навигации из водохранилища производятся навигационные попуски  $Q_{\text{нав}} = 2550 \text{ м}^3/\text{с}$  в период с мая по октябрь. Тогда, при заданном среднегодовом гарантированном расходе

$$Q_{\text{гар}} = 2195 \text{ м}^3/\text{с}, Q_{\text{зим}} (\text{XI-IV}) = \frac{2195 \cdot 12 - 2550 \cdot 6}{6} = 1840 \text{ м}^3/\text{с}. \text{ Здесь}$$

$Q_{\text{зим}} (\text{XI-IV})$  – гарантированный расход в среднем за период с ноября по апрель включительно.

1. По ряду: как максимальный дефицит стока межени до заданного графика попусков обеспеченностью 95%:  $V_{\text{плз}} = 20 \text{ км}^3$ ,  $\beta_{\text{плз}} = 20 / 88,2 = 0,33$ .

2. По формуле (8.2):  $\beta_{\text{сез}} = \alpha t_m - \bar{m}_m K_{\text{Мр}} = 0,365$ ,  $V_{\text{плз}} = 32 \text{ км}^3$ , ошибка 60%.

3. По формуле (8.4):  $\beta_{\text{сез}} = \alpha a t_m - \bar{m}_m K_{\text{Мр}} = 0,29$ ,  $V_{\text{плз}} = 25,5 \text{ км}^3$ , ошибка 26%.

Понятно, что в створах гидроузлов с другими статистическими параметрами годового и меженного стока, а также заданных графиков водоотдачи, ошибки в подсчете полезного объема водохранилища будут изменяться. По утверждению Я.Ф. Плешкова, чем ближе  $\alpha$  к  $K_{\text{Гр}}$  и чем постояннее отдача в течение года, тем ошибка в подсчете полезного объема водохранилища по обобщенным формулам снижается. Исходя из этого, напрашивается вывод, что обобщенные (вероятностные) формулы можно использовать только для экспертной оценки величины полезного объема водохранилища для обеспеченно заданной гарантированной водоотдачи. На стадии проектирования водохранилища расчет его полезного объема следует производить балансовым методом по имеющемуся наблюдаемому или смоделированному стоковому ряду.

#### 8.4. Расчеты сезонного регулирования стока балансовым табличным способом

Наряду с графическими методами (с использованием разностной интегральной кривой стока) применяется табличный способ расчета регулирования стока.

Расчеты регулирования стока по имеющемуся гидрологическому ряду или его расчетному периоду табличным способом выполняются на заключительных стадиях проектирования в целях проверки параметров водохранилища, предварительно определенных упрощенным способом, а также для иллюстрации режима работы водохранилища в многолетнем разрезе.

Табличный способ сводится к решению уравнения водного баланса водохранилища по отрезкам времени  $\Delta t_i$ :

$$Q_{\text{акки}} \Delta t_i = \Delta V_{\text{ви}} = (Q_{\text{пр}i} - Q_{\text{зар}i}) \Delta t_i = [Q_{\text{пр}i} - (Q_{\text{исп}} + Q_{\text{х.сбр}} + Q_n)] \Delta t_i, \quad (8.5)$$

где  $Q_{\text{акки}}$  – расход аккумуляции воды в водохранилище, т.е. разность суммарных притекающего ( $Q_{\text{пр}i}$ ) и зарегулированного ( $Q_{\text{зар}i}$ ) расходов в  $i$ -м интервале;  $\Delta V_{\text{ви}}$  – изменение объема водохранилища, характеризующее его сработку (минус) или наполнение (плюс);  $Q_{\text{исп}}$  и  $Q_{\text{х.сбр}}$  – расходы соответственно полезно используемый и холодные сбросы воды;  $Q_n$  – суммарный расход потерь воды из водохранилища на дополнительное испарение, фильтрацию и ледообразование и расход безвозвратного водопотребления;  $\Delta t_i$  – количество секунд в интервале осреднения.

В зависимости от необходимой точности и интенсивности изменения притока расчет выполняется по интервалам различной длительности. Так, для периодов половодья и паводков используются данные по пентадам и декадам, а за остальное время года – обычно по месяцам. Соответственно этому основными расчетными величинами будут средние пентадные, средние декадные и средние месячные расходы.

Расчеты регулирования стока по длительным гидрологическим рядам рекомендуется вести по форме табл. 8.3.

В зависимости от наличия тех или иных участков водохозяйственного комплекса таблица может несколько видоизменяться.

Суммарный приток к водохранилищу  $Q_{\text{пр}}$  при проведении расчетов по многолетним стоковым рядам задается однозначно для каждого интервала. Суммарная отдача из водохранилища  $Q_{\text{зар}}$  – назначается в зависимости от начального уровня водохранилища в  $i$ -м интервале  $\Delta t(Z_{\text{ин}})$  и корректируется в зависимости от значения конечного уровня водохранилища ( $Z_{\text{ик}}$ ). Суммарные потери воды из водохранилища устанавливаются в зависимости от объема и режима водопотребления и уровней водохранилища в  $i$ -м интервал ( $Z_{\text{ин}}$  и  $Z_{\text{ик}}$ ). Потери воды на дополнительное испарение являются безвозвратными, на фильтрацию – возвратными для водопользователей нижнего бьефа, на ледообразование – временными (возврат их осуществляется в первую декаду половодья).

Уравнение (8.5) решается путем последовательных приближений (итераций). Известны различные способы подбора как при ручном, так и при машинном расчетах, но смысл их сводится к отысканию такого значения  $Z_{\text{ик}}$ , которое приводило бы к выполнению равенства левой и правой частей уравнения.

Таблица 8.3

Табличные водохозяйственные расчеты водохранилища за период с мая 1903 по апрель 1980 г.

Месяц и декада $\Delta t$	Потери стока, м <sup>3</sup> /с						Расходы, средние за $\Delta t$ , м <sup>3</sup> /с		Аккумуляция		Наполнение водохранилища, км <sup>3</sup>		Уровни водохранилища, м	
	безвозвратное	дополнительное испарение	фильтрация	ледообразование	всего	приток нетто $Q_{np}$	запутлированные $Q_{zap}$	$Q_{акк} = Q_{np} - Q_{zap}$ , м <sup>3</sup> /с	$\Delta V_{в} = Q_{акк} \Delta t$ , км <sup>3</sup>	на конец $\Delta t$ , км <sup>3</sup>	на середину $\Delta t$ , км <sup>3</sup>	на конец $\Delta t$ , Z <sub>к</sub>	на середину $\Delta t$ , Z <sub>ср</sub>	
V 1	0	-3	2	-333	-334	2579	1215	1364	1.05	19,53	20,06	516.4	514.7	
2	0	-3	2	0	-1	3102	1190	1912	1.65	20,58	21,40	521.5	519.0	
3	0	-3	2	0	-1	2993	1160	1833	1.74	22,23	23,10	526.0	523.8	
VI 1	0	-5	2	0	-3	2275	1140	1135	0.98	23,97	24,46	528.2	527.1	
2	0	-9	2	0	-7	1996	1130	866	0.45	24,95	25,32	529.8	529.0	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	

Для сохранения баланса водохранилища уровни (и запас воды) его в начале (например, 01.05.1903 г.) и в конце (30.04.1980 г.) расчетного периода должны быть одинаковы.

Процесс регулирования упрощается при пользовании диспетчерским графиком управления работой водохранилища (см. гл. 14). При ориентировании сработки водохранилища на дату самого позднего половодья оно не будет полностью сбрасываться при более раннем начале половодья.

Расчеты начинаются с начала календарного ряда водохозяйственных лет и ведутся «ходом вперед» до конца ряда. При этом на начало половодья первого года принимается полностью сработанным полезный объем водохранилища.

При наперед заданной обеспеченности гарантированной водоотдачи в составе длительного гидрологического ряда выделяется определенное число перебойных лет, т.е. лет с меньшей водоотдачей по сравнению с гарантированной. Например, при обеспеченности 95% и длительности ряда 60 лет число перебойных лет равно трем.

По данным регулирования, за длительный период строят хронологические графики наполнения водохранилища, естественных и зарегулированных расходов воды (с выделением расходов холостых сбросов) аналогично тем, которые строят при графическом способе расчета регулирования стока.

Для характеристики режима работы водохранилища и ГЭС часто прибегают к подсчету и построению кривых продолжительности уровней водохранилища (на начало или конец интервала), естественных и зарегулированных расходов воды, а также напоров и мощностей ГЭС, если в состав водохозяйственного комплекса (ВХК) входит гидроэлектростанция. Продолжительность, как правило, выражается в процентах.

Для подсчета и построения кривых продолжительности в расчетном ряду производится выборка максимальных и минимальных значений соответствующих характеристик. В диапазоне экстремальных значений назначается 10 – 15 и более интервалов. В пределах каждого интервала подсчитывается число случаев, а затем производится их суммирование. Если суммирование числа случаев в интервалах производится от больших значений характеристик к малым, то суммы следует относить к нижней границе интервала, а если суммирование производится от малых значений величин

к большим, то сумму следует относить к верхней границе интервала. В любом случае кривая продолжительности выражает обеспеченность превышения. Такие кривые для примера приведены на рис. 11.5, а и б.

Следует отметить, что совмещение графиков и кривых продолжительности естественных и зарегулированных расходов воды на одном чертеже дает также возможность контроля правильности выполнения расчетов регулирования стока. Контроль состоит в сравнении площадей графиков, заключенных между естественными и зарегулированными расходами воды. При этом площадь срезки (со знаком минус) в интервале времени (продолжительности), где график естественных расходов воды выше графика зарегулированных расходов, должна быть равна площади повышения (со знаком плюс), т.е. разности их площадей в интервале, где зарегулированные расходы воды выше естественных расходов.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Какие необходимы топографические материалы и в чем заключается их обработка?
2. Какие необходимы другие исходные материалы и как они используются в проекте водного хозяйства?
3. В чем заключается физическая природа потерь воды из водохранилища и методы их определения?
4. На каком основании используются в расчетах регулирования стока интегральные кривые?
5. Какие Вы знаете обобщенные методы расчёта сезонного регулирования стока?
6. Как проводится расчет регулирования стока балансовым табличным способом?

## Глава 9. РАСЧЕТЫ МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩАМИ

### 9.1. Основные положения

Многолетнее регулирование стока является наиболее совершенным и заключается в перераспределении стока из многоводных лет и периодов в маловодные. При этом одновременно решается задача выравнивания внутрисезонной неравномерности стока. Следовательно, только при осуществлении многолетнего регулирования стока водохранилищами можно повысить годовой сток маловодных лет и увеличить располагаемые к использованию водные ресурсы в остро дефицитный по воде межлетний период.

В практике расчетов многолетнего регулирования стока водохранилищами существуют два основных подхода. Первый подход основан на использовании в расчетах календарных рядов прошедших лет наблюдений за стоком (способ интегральных кривых в графической и табличной модификациях). Второй подход основан на применении методов теории вероятностей и математической статистики, базирующихся на использовании обобщенных (вероятностных) стоковых характеристик, полученных по данным натурных наблюдений за прошедший период времени.

По Я.Ф. Плешкову, «...расчеты по имеющимся фактическим рядам стока без контроля по обобщенному методу нельзя считать надежными, так как ни один из имеющихся рядов (даже из числа наиболее длительных) не может охватить все возможные комбинации последовательности величин стока».

Представление о годовом стоке как о случайном процессе позволило применять методы теории вероятностей и математической статистики в расчетах многолетнего регулирования стока. Первоначально вероятностные методы расчета применялись к годовым величинам стока, не учитывая внутригодовых периодических изменений его. Поэтому основанные на этом положении методы водохозяйственных расчетов решают задачи только многолетнего регулирования стока и позволяют определять лишь многолетнюю составляющую полезного объема водохранилища  $V_{\text{млн}}$ , ее относительное значение обозначается  $\beta_{\text{млн}}$  ( $\beta_{\text{млн}} = V_{\text{млн}} / \bar{W}_r$ , где  $\bar{W}_r$  – средний многолетний объем годового стока).

Вторая часть полезного объема водохранилища предназначена для выравнивания внутрисезонной неравномерности и называется *сезонной составляющей* полезного объема водохранилища. Ее относительное значение  $\beta_{с.с} = V_{с.с} / W_r$ , где  $V_{с.с}$  – сезонная составляющая полезного объема водохранилища. Сезонная составляющая полезного объема водохранилища определяется независимо от многолетней при помощи специальных методов.

Таким образом, полезный объем водохранилища многолетнего регулирования

$$V_{плз} = V_{мин} + V_{с.с.}$$

или в относительных единицах

$$\beta_{плз} = \beta_{мин} + \beta_{с.с.}$$

## 9.2. Методы определения составляющих полезного объема водохранилища многолетнего регулирования стока

Широкое распространение раздельного определения составляющих объема водохранилища объясняется наличием номограмм (графиков) для определения  $\beta_{мин}$  и простотой расчета  $\beta_{с.с.}$ . Это используется далее при разработке диспетчерских графиков при многолетнем регулировании стока (см. гл. 14) и пропуске половодий и паводков (см. гл. 15).

Для определения многолетнего объема водохранилища  $V_{мин}$ , или коэффициента многолетнего обмена  $\beta_{мин} = V_{мин} / W_r$ , (в дальнейшем  $\beta$ ) в практике водохозяйственного проектирования используются четыре пакета номограмм, разработанных различными методами и при разных допущениях. Номограммы представляют собой графические зависимости  $\beta = f(C_{вр}, C_{ст}, r_1, \alpha, p)$ , где  $C_{вр}$ ,  $C_{ст}$ ,  $r_1$  – параметры годового стока,  $\alpha$  – относительный коэффициент регулирования (гарантированная отдача брутто  $Q_{гар}$  в долях от нормы годового стока  $Q_r$ ),  $p$  – обеспеченность гарантированной водоотдачи, т.е. число лет, в которых водоотдача будет не ниже  $Q_{гар}$  по отношению к общему числу лет ряда, в процентах.

### 1. Номограммы Я.Ф. Плешкова.

Номограммы Я.Ф. Плешкова рассчитаны композиционным графическим методом С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Построение номограмм произведено в предположении, что коррелятивная связь между стоком в смежные годы отсутствует, т.е.  $r_1 = 0$ . Однако такое

допущение в большинстве случаев не подтверждается. Кроме того, в качестве функции распределения стока принята кривая Пирсона III типа ( $C_s = 2 C_v$ ), что также является определенным допущением. Границы изменения искомых параметров на номограммах Плешкова следующие: коэффициента регулирования стока до  $\alpha 0,90$ ;  $C_v$  до 1,20;  $\beta$  до 4,30; обеспеченности водоотдачи  $p = 75, 80, 85, 90, 95, 97, 98$  и 99%.

Значения водоотдачи, входящие в изображенные на графиках Плешкова зависимости, характеризуют отдачу брутто – полный объем воды, изымаемой из водохранилища, без разделения его на воду, используемую потребителями, и на потери воды в основном на испарение с водной поверхности водохранилища. Расчет подобных потерь воды приведен в п. 8.1 и не представляет трудности.

Для примера на рис. 9.1 дана номограмма Я.Ф. Плешкова для  $p = 95\%$ .

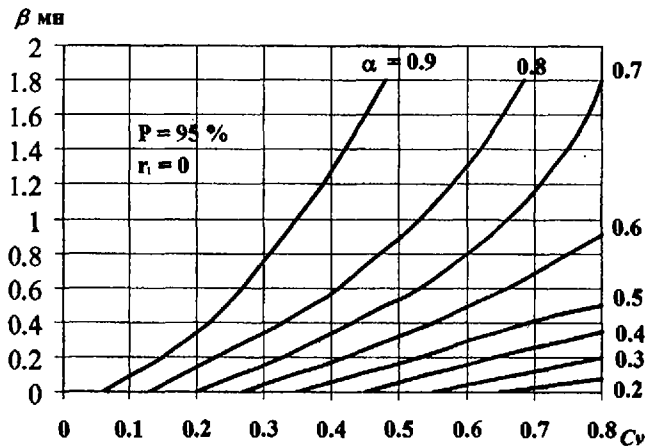


Рис. 9.1. Номограмма Я.Ф. Плешкова для определения многолетней составляющей полезного объема водохранилища.

## 2. Номограммы И.В. Гуглия.

Номограммы рассчитаны композиционным аналитическим методом С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. В многолетнем разрезе изменений стока прослеживается некоторая цикличность в виде чередования группировок из многоводных и маловодных лет. Длительность

и водность таких группировок не имеет отчетливой периодической закономерности. Однако ярко выраженная цикличность, являющаяся проявлением тенденции сохранения аномалий, прежде всего означает, что вероятность появления за маловодным годом снова маловодного больше, чем многоводного. Расчеты многих авторов (П.А. Ефимовича, С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, Д.Я. Ратковича, А.Ш. Резниковского и др.) по ряду рек показали, что коэффициенты корреляции между стоком смежных лет практически изменяются в пределах от значения несколько меньше нуля до 0,40 – 0,50, преимущественно до 0,25 – 0,30. При этом коэффициент вариации стока за  $n$ -летие определяется по формуле С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля:

$$C_{v_n} = \frac{C_{vr}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2r_1}{n(1-r_1)} \left(n - \frac{1-r_1^n}{1-r_1}\right)}.$$

Поскольку коэффициент  $C_{v(n)}$  при учете коррелятивной связи возрастает, то и необходимый объем водохранилища должен быть больше, чем без учета связи.

Номограммы И.В. Гуглия построены при  $r_1 = 0,3$  (среднем значении для рек России) в широком диапазоне стоковых и водохозяйственных характеристик:  $\alpha$  до 0,95;  $C_{vr}$  до 1,20;  $\beta$  до 4,50; и  $p = 75, 90, 95, 97$  и 99%.

Значения водоотдачи на номограммах И.В. Гуглия характеризуют отдачу брутто, т.е. полный объем воды, изымаемой из водохранилища (используемый потребителями объем воды плюс потери воды в основном на испарение).

Для промежуточных значений коэффициента корреляции  $r_1$  ( $0 < r_1 < 0,3$  или  $r_1 > 0,3$ ) многолетний объем водохранилища  $\beta$  (или иной другой параметр) находится путем интерполяции между номограммами Я.Ф. Плешкова и И.В. Гуглия.

При построении номограмм Гуглий, так же как и Плешков, в качестве функции распределения стока принимал кривую Пирсона III типа. В этом случае коэффициент асимметрии  $C_s = 2 C_v$ , что является определенным допущением.

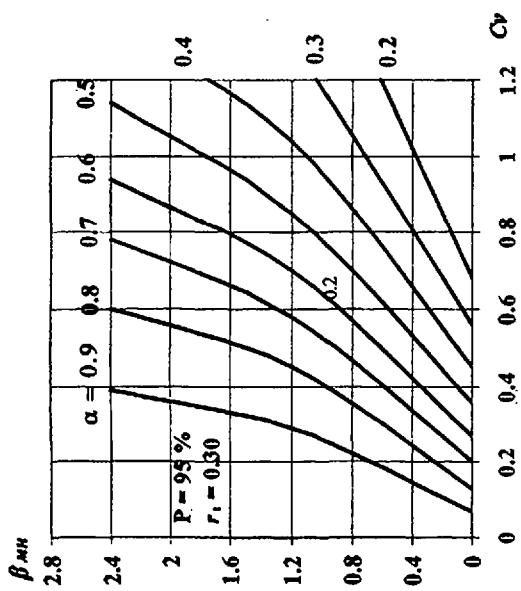
На рис. 9.2 для примера дана номограмма И.В. Гуглия для  $p = 95\%$ .

9.2. Номограмма И.В. Гугля для определения  
 многолетней составляющей полезного объема волохранилища.

Таблица 9.1

Значения водоотдачи, определенные по номограммам  
 И.В. Гугля и Я.Ф. Плешкова

Параметр регулирования		Расчетная водоотдача		Среднее уменьшение водоотдачи, %
$r$ , %	$C_r$	по Плешкову $r_1 = 0,0$	по Гуглю $r_1 = 0,3$	
90	1,20	0,85	0,75	10
	0,80	0,77	0,69	
	0,40	0,64	0,57	
	1,20	0,75	0,62	
	0,80	0,65	0,55	
	0,40	0,50	0,43	
97	1,20	0,73	0,63	15
	0,80	0,65	0,56	
	0,40	0,52	0,43	
	1,20	0,62	0,48	
	0,80	0,53	0,41	
	0,40	0,39	0,29	
	0,80			25



Сопоставление номограмм И.В. Гуглия с номограммами Я.Ф. Плешкова свидетельствует о том, что во всех случаях при учете автокорреляции отмечается уменьшение расчетной водоотдачи. Расхождение тем больше, чем выше коэффициент изменчивости стока и обеспеченность водоотдачи, что полностью следует отнести за счет влияния учета связности годового стока. В табл. 9.1 сопоставляются результаты, получаемые по обеим номограммам.

**3. Номограммы института «Энергосетьпроект».** Номограммы получены на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло).

Моделированию гидрологических рядов методом Монте-Карло посвящены работы Г.Г. Сванидзе, Л.Ш. Резниковского и др. Под методом Монте-Карло понимается совокупность приемов, с помощью которых можно получить решение задач на основе многократных случайных испытаний. Применительно к гидрологии и регулированию стока основная идея метода состоит в получении искусственного гидрологического ряда, соответствующего закономерностям исходного натурального процесса речного стока. В качестве критерия соответствия указанных двух рядов (наблюденного и нового) обычно принимается постоянство не только статистических параметров стока (нормы  $\bar{Q}_r$ , коэффициентов вариации  $C_v$  и асимметрии  $C_s$ , коэффициента автокорреляции  $r_1$ ), но и их функции распределения годовых значений стока. В этом случае составленный статистическим розыгрышем искусственный гидрологический ряд не увеличивает и принципиально не может увеличить репрезентативность исходного гидрологического ряда ограниченной длительности, по которому установлены статистические параметры. Искусственный ряд обладает той же репрезентативностью по статистическим параметрам, что и короткий. Однако его преимущество перед коротким (исходным) рядом состоит в том, что он содержит большее количество разнообразных сочетаний маловодных и многоводных лет, сезонов, а также множество других вариантов, возможных при принятом законе изменения колебаний стока. Поэтому следует ожидать, что результаты расчетов регулирования стока, выполненные по искусственному (смоделированному) ряду, более надежны, чем результаты аналогичных расчетов по исходному (короткому) гидрологическому ряду.

По смоделированным рядам (обычно они имеют длительность порядка 1000 лет и более) ведется расчет регулирования стока точно так же, как это делается по календарному гидрологическому ряду.

На основе расчетов по методу Монте-Карло рассчитаны и построены номограммы для определения многолетней составляющей объема водохранилища для значительно большего диапазона значений коэффициента автокорреляции  $r_1$  и соотношений между  $C_s$  и  $C_v$ . Построение номограмм проведено в Энергосетьпроекте (под руководством А.Ш. Резниковского) при разных дискретных значениях коэффициента автокорреляции  $r_1$  (от 0,0 до 0,6 с интервалом 0,1) и трех соотношениях между коэффициентами асимметрии и вариации ( $C_s/C_v = 4; 2$  и  $1,5$ ). При  $C_s/C_v = 2$  и  $r_1 = 0$  указанные номограммы совпадают с номограммами Я.Ф. Плешкова, а при  $r_1 = 0,3$  – с номограммами И.В. Гуглия при одних и тех же значениях расчетной обеспеченности водоотдачи.

Длительность искусственных рядов для большей надежности построения номограмм авторами принималась равной 2000 лет с пределами изменения коэффициента вариации от 0,2 до 1,5 с интервалом 0,1. По каждому ряду проводились расчеты регулирования стока для значений отдачи,  $\alpha$  от 0,1 до 1,0 с интервалом 0,1. Нижняя граница измерения многолетнего объема водохранилища  $\beta$  в расчетах принималась равной нулю, а верхняя – трем.

По результатам проведенных расчетов на клетчатке вероятностей строились графики  $p = f(\alpha, \beta)$ , на основе которых для разных значений расчетной обеспеченности  $p$  формировались окончательные номограммы  $F(C_s, r_1, \alpha, \beta, p) = 0$ , которые в практику водохозяйственного проектирования вошли под названием номограмм Энергосетьпроекта.

Следует отметить, что номограммы построены авторами на основе использования кривой Пирсона III типа при отношении  $C_s/C_v = 2$ , а при других двух отношениях ( $C_s/C_v = 4,0$  и  $1,5$ ) – трехпараметрических кривых распределения С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля.

Преимущество метода Монте-Карло состоит в том, что он удачно сочетает возможность иллюстрации режима работы установок по хронологическому ряду стока с возможностями широкого вероятностного обобщения результатов.

Номограммы Я.Ф. Плешкова, И.В. Гуглия или «Энергосетьпроекта» позволяют определять многолетнюю составляющую полезной

го объема водохранилища для заданных параметров годового стока ( $C_{вр}$ ,  $C_s/C_v$ ,  $r_1$ ), гарантированной водоотдачи  $\alpha$  брутто, нормируемой обеспеченностью  $p$ .

При комплексном использовании водотока, когда необходимо регулировать сток для двух или трех потребителей (на две или три обеспеченности), С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем предложены формулы для определения приведенной обеспеченности  $p'$  большей водоотдачи (см. гл. 7). Например, если требуется гарантировать отдачу  $\alpha_1$  с обеспеченностью  $p_1$ , а отдачу  $\alpha_2$  с обеспеченностью  $p_2$  и  $\alpha_1 > \alpha_2$ , а  $p_1 < p_2$ , то

$$p' = p_1 + (p_2 - p_1)\alpha_2/\alpha_1.$$

По величине  $p'$  и  $\alpha_1$  с номограмм при известных  $C_{вр}$ ,  $C_s/C_v$  и  $r_1$  можно определить многолетнюю составляющую полезного объема, необходимого для регулирования стока на две обеспеченности.

**4. Номограммы Г.П. Иванова.** Асимметричность годового стока некоторых рек Сибири и Дальнего Востока, на которых в настоящее время проектируется создать водохранилища, значительно отличается от отношений  $C_s/C_v$ , для которых разработаны вышеприведенные номограммы. Поэтому не следует пренебрегать и номограммами Г.П. Иванова. Его номограммы получены не композиционными методами, а путем обобщения результатов многолетнего регулирования по конкретным гидрологическим рядам 18 рек. При расчете номограмм Г.П. Иванов принимал водоотдачу  $\alpha$  и многолетнюю составляющую полезного объема  $p$  в виде следующих функций:

$$\Phi = (1 - \alpha)/C_v, \quad \xi = \beta/C_v.$$

Номограммы вида  $\xi = (\Phi, C_s)$  разработаны для  $p$ , равной 80, 85, 90, 95, 97, 99 и 100%. На рис. 9.3 для примера дана номограмма для  $p$ , равной 95%.

$$\xi = \beta/C_v.$$

Номограммы Г.П. Иванова обладают существенными преимуществами перед вышеприведенными номограммами, а именно: дают решение задачи в зависимости от  $C_v$ , т.е. не связывая вопрос с соблюдением  $C_s = 2C_v$  или  $C_s/C_v = 1,5$  и  $4,0$ ;  $\alpha$  рассмотрено до  $\alpha = 1,0$ ; учитывают связь между стоком смежных лет. При этом в среднем по 18 рядам  $\bar{r}_1 = 0,19$ , а  $\bar{C}_{вр} = 0,25$ .

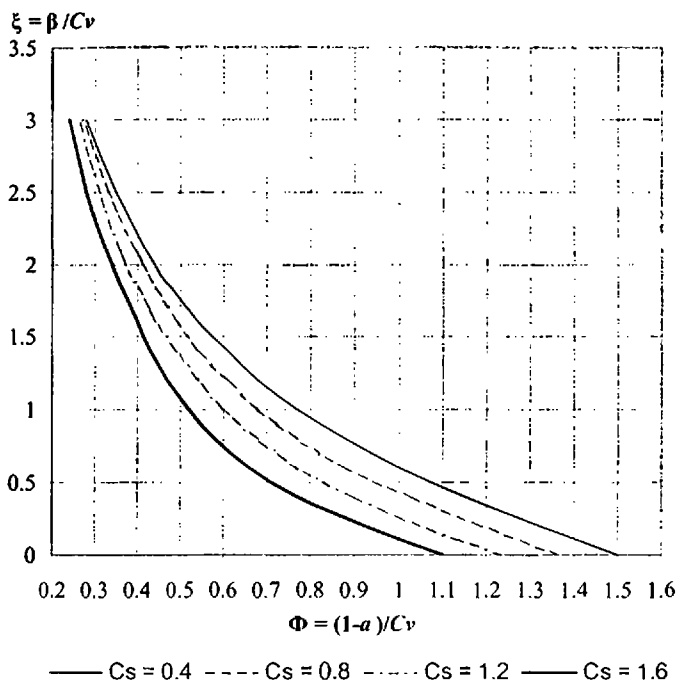


Рис. 9.3. Номограмма Г.П. Иванова для определения  
многолетней составляющей полезного объема  
водохранилища.

Водоотдача  $\alpha$  по номограммам Г.П. Иванова, как и по другим номограммам, характеризует отдачу брутто, т.е. полезно используемый объем воды и потери воды на испарение.

**Методы определения сезонной составляющей полезного объема водохранилища многолетнего регулирования стока.** В случае многолетнего регулирования стока ( $K_{гп} < \alpha \leq 1,0$ ) сезонная составляющая полезного объема лишь условно отделяется от многолетней и определяется во взаимосвязи со всеми параметрами водохранилища. Как утверждали С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель, «сезонная составляющая объема должна быть подобрана таким образом, чтобы вероятность опорожнения всего водохранилища, как

единого целого, отвечала требуемой обеспеченности». Сохранение той же маловодности расчетной межени, как и в случае годового регулирования, привело бы к увеличению полезного объема водохранилища, так как вероятность совпадения маловодного многолетия с маловодной предыдущей меженью уменьшается по сравнению с вероятностью каждого из указанных элементов, рассматриваемых в отдельности.

В основе расчета сезонной составляющей полезного объема водохранилища лежит схема, предложенная С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем, согласно которой началу периода сработки многолетнего объема водохранилища предшествует год со стоком, равным водоотдаче  $\alpha$ . Такое предположение является вполне обоснованным, так как если бы предшествовал маловодный год по отношению к водоотдаче ( $K_i < \alpha$ ), то такой год вошел бы в критический период сработки многолетнего объема; если бы предшествовал многоводный год, имели бы место избытки стока. Таким образом, для случаев многолетнего регулирования стока степень маловодности межени, служащей для определения сезонной составляющей полезного объема, устанавливается в зависимости от глубины регулирования (величины  $\alpha$ ). При равномерной в течение года водоотдаче С.Н. Крицкий и М.Ф. Менкель предложили следующую эмпирическую формулу для определения сезонной составляющей полезного объема водохранилища многолетнего регулирования стока:

$$\beta_{с.с.} = \alpha t_m - \overline{m_m} + m_m \frac{1 - K_{мр}}{1 - K_{гр}} (1 - \alpha) \quad (9.1)$$

Здесь обозначения те же, что и в формулах (8.2) и (8.3).

Если коэффициенты изменчивости годового  $C_{гг}$  и меженного  $C_{мм}$  стоков характеризуются близкими значениями, то  $K_{мр}$  может считаться равным  $K_{гг}$ . Тогда формула (9.1) упрощается и приобретает вид

$$\beta_{с.с.} = \alpha(t_m - \overline{m_m}). \quad (9.2)$$

Абсолютные значения сезонной составляющей полезного объема водохранилища при многолетнем регулировании

$$V_{с.с.} = \beta_{с.с.} \overline{W}_г.$$

В случае наличия длительного ряда наблюдений за стоком сезонную составляющую полезного объема при многолетнем регулировании стока рекомендуется определять как наибольший дефицит объема межени (до зарегулированного расхода  $Q_{\text{зар}} = \alpha \bar{Q}_r$ ) года со стоком, равным водоотдаче  $\alpha$ . Во избежание уменьшения сезонной составляющей ее следует рассчитывать применительно к нескольким моделям помесечного распределения стока с последующей приводкой их к годовой водоотдаче, умножая среднемесячные расходы моделей на коэффициенты приводки  $K'$ . При этом  $K' = Q_{\text{зар}} / Q_{ri}$ . Здесь  $Q_{ri}$  – среднегодовой расход модели. За расчетное значение сезонной составляющей объема принимается наибольший дефицит стока в рассмотренных пяти–семи моделях распределения стока.

Формулы С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля позволяют определить сезонную составляющую полезного объема водохранилища при постоянной в течение года водоотдаче. Практика показывает, что формулы по отношению к расчетам по ряду наблюдений и неравномерному графику водоотдачи могут давать завышение величины сезонной составляющей до 16%. Однако, в целом на суммарный полезный объем водохранилища эта ошибка в подсчете  $V_{\text{с.с}}$  скажется незначительно, особенно при равенстве сезонной и многолетней составляющих полезного объема водохранилища.

### **9.3. Расчеты многолетнего регулирования стока балансовым табличным способом по календарным гидрологическим рядам**

Балансовые расчеты по длительным гидрологическим рядам выполняются в графической (по интегральной кривой стока) и табличной модификациях.

Графический способ выгодно отличается простотой и наглядностью, что очень важно для учебных целей, а также в случае многовариантных расчетов при выборе основных параметров водохранилища. Проведение многолетнего регулирования по интегральной кривой стока показано на рис. 9.4.

Для решения основных задач при многолетнем регулировании стока на интегральной кривой за длительный ряд наблюдений отыскивается наиболее маловодный период. Такой период, согласно рисунку, составляют годы с шестого по девятый.

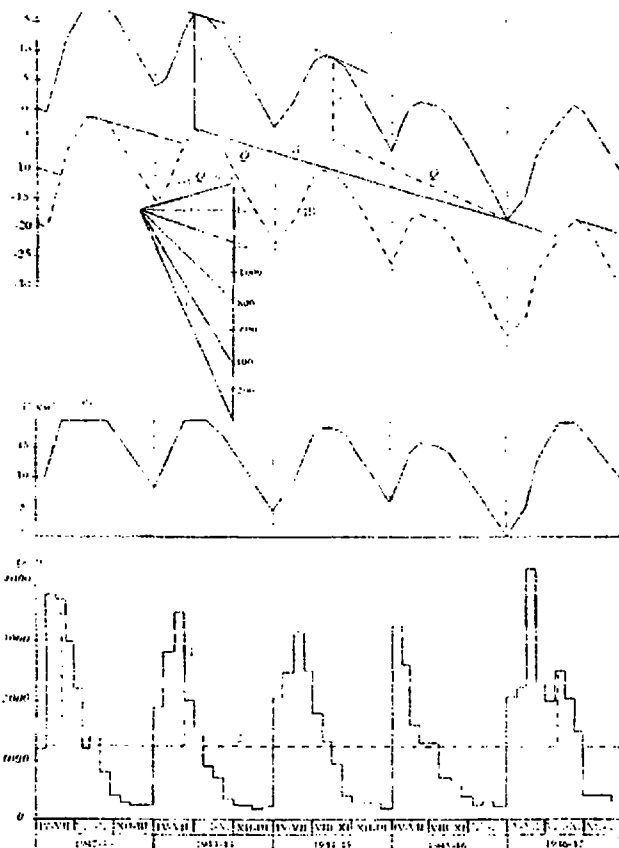


Рис. 9.4. Расчеты многолетнего регулирования по интегральной кривой стока. *a* – интегральные кривые: естественного стока (I), зарегулированного стока (II) и контрольная (III); *b* – лучевой масштаб; *c* – график наполнения водохранилища; *z* – графики естественных (1) и зарегулированных (2) расходов воды.

Решение задач многолетнего регулирования графоаналитическим способом проводится в отношении всего полезного объема водохранилища.

Первая задача (по заданному гарантированному расходу определить полезный объем водохранилища) решается проведением касательной к интегральной кривой в конце маловодья «ходом назад»

с наклоном заданного расхода  $Q_{\text{гар}}$ . Наибольшее расстояние между проведенной касательной и интегральной кривой в пределах маловодья и определит необходимый для осуществления многолетнего регулирования полезный объем водохранилища  $V$  по заданному расходу  $Q_{\text{гар}}$ . В случае задания меньшего расхода  $Q_{\text{гар}}'$  полезный объем водохранилища составит  $V'$ .

Определяя, таким образом  $V$ , проводят расчеты регулирования по остальным годам имеющегося ряда, для чего строят контрольную интегральную кривую (см. рис. 9.4), соответствующую наполненному водохранилищу. Интегральная кривая естественного стока соответствует пустому водохранилищу. Расчеты с расходом  $Q_{\text{гар}}$  соответствующим объему  $V$ , продолжают «ходом вперед» от конца маловодья, когда водохранилище опорожнено, до конца гидрологического ряда, а затем от начала ряда до начала сработки за маловодье, т.е. также до точки, в которой определился полезный объем. Для соблюдения баланса стока необходимо объем водохранилища в конце гидрологического ряда принять и на начало ряда.

Решение второй задачи (по заданному полезному объему определить расход) также начинается с рассмотрения выбранного маловодья. На расстоянии, равном заданному объему  $V$ , вниз от основной кривой строится контрольная кривая (интегральная). В полосе между ними проводится прямая, которая является касательной к основной кривой в точке конца маловодья и к контрольной в точке начала маловодья. Наклоном этой касательной (по лучевому масштабу) и определяется зарегулированный расход. Остальные построения аналогичны вышеупомянутому.

Хронологические графики наполнений, а также естественных и зарегулированных расходов воды, характеризующих режим работы водохранилища, приведены на рис. 9.4, в, г. На графиках видно, что в течение 2-х лет сбросов не было, и сохранялись постоянные зарегулированные расходы. В остальные 3 года водохранилище заполнялось до НПУ и работало со сбросами.

Расчеты многолетнего регулирования стока балансовым табличным способом проводятся в форме табл. 8.3, реализующей уравнение водного баланса (8.5). Такие расчеты проводятся на заключительных стадиях проектирования в целях уточнения параметров водохранилища, установленных предварительно обобщенными, а также для анализа длительного режима работы водохранилища и гидроузла в целом.

Порядок заполнения граф таблицы остается таким же, что и при сезонном регулировании, с той лишь разницей, что расчеты начинаются с первого года маловодного периода, на начало которого водохранилище принимается заполненным. Полная сработка водохранилища при правильно выбранных параметрах водохранилища (полезного объема и соответствующего ему гарантированного расхода) осуществляется в конце самого длительного маловодного периода с учетом снижения гарантированной водоотдачи в крайне маловодные годы. Число таких лет устанавливается в соответствии с принятой расчетной обеспеченностью водоотдачи  $p$ . Так, например, при  $p = 95\%$  и длительностью ряда 60 лет допустимое число перебойных лет (с отдачей менее гарантированной) равно трем.

Для сохранения баланса водохранилища уровни (и запас воды) его в начале (например, 01.05.1903 г.) и в конце (30.04.1980 г.) расчетного периода должны быть одинаковы.

Расчеты регулирования стока балансовым табличным способом сопровождаются построением хронологических графиков хода наполнения – сработки водохранилища, а также естественных и зарегулированных расходов воды (аналогичных показанным на рис. 9.4). Для количественной оценки изменения характеристик зарегулированного режима рассчитываются и строятся кривые продолжительности этих элементов.

Трудоемкие табличные расчеты в настоящее время проводятся, как правило, с использованием современных вычислительных средств, что значительно экономит время, повышает точность и надежность выбора параметров водохранилища и гидроузла. При этом не может быть и речи о каких-то универсальных программах, так как они должны разрабатываться с учетом специфики будущего водного объекта и обособленных требований к режиму его работы со стороны водопотребителей. Исходные материалы для проведения подобных расчетов те же, что и для проведения сезонного регулирования стока.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. В чем заключаются преимущества раздельного определения составляющих полезного объема водохранилища многолетнего регулирования стока?
2. Какие номограммы используются для определения многолетней составляющей полезного объема водохранилищ? В чем состоит их принципиальное отличие?
3. Как определить сезонную составляющую объема водохранилища?
4. С какой целью и как проводятся балансовые расчеты по длительным гидрологическим рядам?

## Глава 10. РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОХРАНИЛИЩА

Водохозяйственное проектирование начинается с расчета и построения обобщенной водохозяйственной характеристики водохранилища.

Обобщенная водохозяйственная характеристика связывает относительный коэффициент регулирования  $\alpha$  (гарантированная отдача брутто  $Q_{\text{гар}}$  в долях нормы годового стока  $Q_{\text{г}}$ ) заданной обеспеченности  $p$  и необходимый для поддержания полезный объем водохранилища  $V_{\text{плз}}$  или в абсолютных значениях  $Q_{\text{гар}} = f(V_{\text{плз}})$ . Вид такой зависимости приведен на рис. 10.1. На обобщенной водохозяйственной характеристике можно выделить зону сезонного и многолетнего регулирования стока. Граница между ними проходит по  $\alpha = K_{\text{гр}}$ , где  $K_{\text{гр}}$  – модульный коэффициент годового стока расчетной обеспеченности (среднегодовой расход расчетной обеспеченности  $Q_{\text{гр}}$  в долях нормы годового расхода  $Q_{\text{г}}$ ).

Полезный объем водохранилища в зоне сезонного регулирования стока ( $K_{\text{мин}} < \alpha \leq K_{\text{гр}}$ ) определяется при постоянной водоотдаче в течение года по формулам (8.2) или (8.3). При непостоянной водоотдаче в течение года или в случае неустойчивой летней межени и переходного периода от зимней межени к весеннему половодью, что имеет место на реках востока и северо-востока, расчеты проводятся по длительному гидрологическому ряду. Расчеты (при этом) сводятся к следующему – задается величина  $\alpha$  от  $\alpha_{\text{мин}}$  до  $\alpha_{\text{кр}}$ , а следовательно, и  $Q_{\text{гар}} = \alpha Q_{\text{г}}$ . В каждом году рассматриваемого ряда водохозяйственных лет рассчитывается объем дефицита стока межени до заданного вариантно гарантированного расхода  $Q_{\text{гар}i}$ . Объем дефицита стока межени можно определять последовательным суммированием месячных дефицитов стока (с конца межени до начала половодья), а проще находить по уравнению водного баланса:

$$W_{\text{деф}} = (\Sigma Q_{\text{меж}} - \Sigma Q_{\text{гар}}) \Delta t,$$

где  $W_{\text{деф}}$  – суммарный объем дефицита стока межени, численно равный полезному объему водохранилища;  $\Sigma Q_{\text{меж}}$  – сумма среднемесячных расходов воды, за те месяцы, когда  $Q_{\text{меж}} < Q_{\text{гар}}$ ;  $\Sigma Q_{\text{гар}} = n_{\text{меж}} Q_{\text{гар}}$ ;  $n_{\text{меж}}$  – число меженных месяцев, в которые  $Q_{\text{меж}} < Q_{\text{гар}}$ ;  $\Delta t$  – среднее число секунд в месяце. Затем полученные  $W_{\text{деф}}$  ранжи-

руются в порядке их возрастания с подсчетом обеспеченности по формуле С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля:

$$p = m / (n + 1) \cdot 100\%,$$

где  $m$  – порядковый номер дефицита в ранжированном ряду, а  $n$  – число лет ряда. За расчетный полезный объем водохранилища сезонного регулирования стока принимается объем дефицита стока межени расчетной обеспеченности  $p$ . В табл. 10.1 приведены объемы дефицита стока межени обеспеченностью 95% для одной из сибирских рек.

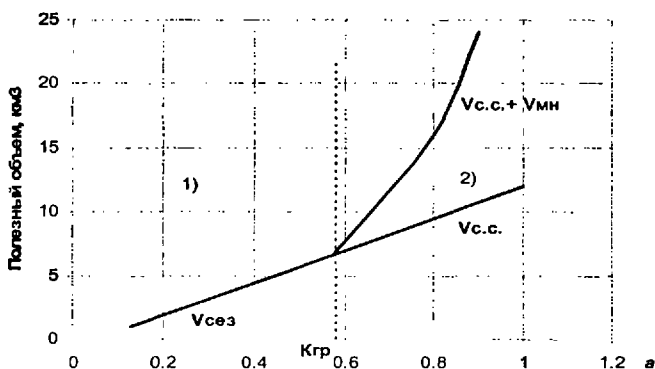


Рис. 10.1. Зависимость коэффициента регулирования стока ( $\alpha$ ) от полезного объема водохранилища.

$V_{сез}$  – полезный объем при сезонном регулировании стока;  $V_{с.с.}$  и  $V_{мн}$  – сезонная и многолетняя составляющие полезного объема при многолетнем регулировании стока;  $K_{гр}$  – модульный коэффициент годового стока расчетной обеспеченности.

- 1 – зона сезонного регулирования стока ( $K_{мин} < \alpha \leq K_{гр}$ );
- 2 – зона многолетнего регулирования стока ( $K_{гр} < \alpha \leq 1.0$ ).

Таблица 10.1

**Сезонный (полезный) объем водохранилища  
в зоне сезонного регулирования стока**

$\alpha$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,58
$Q_{тар} = \alpha Q_r, \text{ м}^3/\text{с}$	148	222	296	370	425
$V_{сез} = W_{леф}, \text{ км}^3$	2,19	3,39	4,73	6,07	7,06

Примечание.  $\alpha = 0,58$  соответствует  $K_{r,95\%}$  при статистических параметрах годового стока  $C_v = 0,27$  и  $C_s / C_v = 1,0$ .

Сезонный объем, рассчитанный по формуле (8.2), определялся для  $\alpha = 0,58$  равным  $7,21 \text{ км}^3$ , т.е. ошибка в подсчете  $V_{сез}$  по формуле по отношению к подсчету по ряду составила всего 2%, что находится в пределах точности расчета.

Из рис. 10.1 и табл. 10.1 видно, что связь между  $\alpha$  и  $V_{плз}$  в зоне сезонного регулирования стока однозначная, т.е. чем больше  $\alpha$ , тем большая  $V_{плз}$  требуется для его обеспечения.

В зоне многолетнего регулирования стока ( $K_{гр} < \alpha \leq 1,0$ ) построение водохозяйственной характеристики основано на условном разделении полезного объема водохранилища на две составляющих: сезонную ( $V_{с.с.}$ ) и многолетнюю ( $V_{мл}$ ) составляющие, т.е.  $V_{плз} = V_{с.с.} + V_{мл}$  или в относительных единицах  $\beta_{плз} = \beta_{с.с.} + \beta_{мл}$ , где  $\beta_{плз} = \beta_{с.с.} + \beta_{мл}$  — полезный объем и его составляющие в долях от среднемноголетнего объема годового стока  $\overline{W}_r$ .

Сезонная составляющая полезного объема определяется, как правило, по формулам С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (9.1) или (9.2). При наличии длительного ряда наблюдений за стоком сезонную составляющую полезного объема можно определять как дефицит стока межени до гарантированного расхода ( $\alpha \overline{Q}_r$ ) года со среднегодовым расходом, равным водоотдаче ( $\alpha \overline{Q}_r$ ). Для этого из ряда наблюдений за стоком выбирается 5–7 лет с  $Q_{ri} \approx (\alpha \overline{Q}_r)$ . Затем сток их приводится к ( $\alpha \overline{Q}_r$ ) через коэффициент приводки  $K_{прив} = Q_{ri}/(\alpha \overline{Q}_r)$ . Определяются суммарные объемы дефицита стока межени до расхода ( $\alpha \overline{Q}_r$ ) и в качестве расчетной  $V_{с.с.}$  принимается наибольший объем дефицита стока межени.

Многолетняя составляющая полезного объема  $V_{мл}$  определяется по номограммам Я.Ф. Плешкова, И.В. Гуглия, Г.П. Иванова, института «Энергосетьпроект» в зависимости от коэффициента автокорреляции  $r$ , и соотношений  $C_s/C_r$  годового стока.

Расчеты проводятся в удобной табличной форме, которая для примера для одной из рек Сибири дана в табл. 10.2.

Исходными данными для табличного расчета являются статистические параметры годового и меженного стока. При этом длительность межени принята в жестких, постоянных границах. Эти границы устанавливаются по среднемесячным за многолетие расходам воды. По ним в межень включаются те месяцы, среднемесячные расходы которых меньше среднемноголетнего расхода воды  $\overline{Q}_r$ . В нашем примере длительность межени определилась в семь месяцев. Ниже приводятся значения исходных параметров.

$$\overline{W}_r = 23,3 \text{ км}^3; C_{vr} = 0,27; C_s/C_r = 1,0; K_{r95\%} = 0,575.$$

$$\overline{W}_m = 23,3 \text{ км}^3; C_{vm} = 0,57; C_s/C_v = 4,0; K_{m95\%} = 0,39.$$

$$t_m = 7 / 12 = 0,58; \overline{m}_m = \overline{W}_m / \overline{W}_r = 0,07.$$

Таблица 10.2

Расчет обобщенной водохозяйственной характеристики водохранилища в зоне многолетнего регулирования стока (от  $\alpha > K_{r95\%}$  до  $\alpha = 0,9$ )

$\alpha$	$\beta_{\text{мин}}$	$\alpha t_m$	$\overline{m}_m = \frac{1 - K_{m95\%}}{1 - K_{r95\%}} (1 - \alpha)$	$\beta_{\text{с.с}}$	$V_{\text{с.с.}} = \beta_{\text{с.с.}} \overline{W}_r$ , км <sup>3</sup>	$\beta_{\Sigma} = \beta_{\text{с.с.}} + \beta_{\text{мин}}$	$V_{\text{полз}} = \beta_{\Sigma} \overline{W}_r$ , км <sup>3</sup>
0,70	0,10	0,41	0,03	0,37	8,62	0,47	10,8
0,80	0,24	0,46	0,02	0,41	9,55	0,63	15,1
0,85	0,38	0,49	0,02	0,44	10,3	0,82	19,1
0,90	0,59	0,52	0,01	0,46	10,7	1,05	24,5

Для справки: сезонная составляющая, рассчитанная по стоковому ряду, определялась при  $\alpha = 0,9$  равной  $11,6 \text{ км}^3$ , т.е. возможная ошибка подсчета ее по формуле составила 8%.

По данным таблицы построена обобщенная водохозяйственная характеристика в зоне многолетнего регулирования стока (см. рис. 10.1).

Из рисунка видно, что в пределах многолетнего регулирования стока обобщенная водохозяйственная характеристика асимптотически приближается к своему пределу ( $\alpha = 1,0$ ) или ( $Q_{\text{гпр}} = \overline{Q}_r$ ), т.е. в зоне многолетнего регулирования стока значительное приращение  $V_{\text{полз}}$  слабо влияет на  $\alpha(Q_{\text{гпр}})$ . Это объясняется тем, что с ростом полезного объема при многолетнем регулировании увеличивается период его сброски  $T$  (см. рис. 9.4). Поскольку приращение гарантированного расхода воды  $\Delta Q_{\text{гпр}}$  обратно пропорционально величине  $T$ , то относительный эффект от приращения полезного объема водохранилища понижается и в пределе при  $Q_{\text{гпр}} = \overline{Q}_r$  ( $\alpha = 1,0$ ) стремится к нулю, когда  $T$  стремится к бесконечности:  $\Delta Q_{\text{гпр}} = \Delta V / T_{\infty} \rightarrow 0$ .

#### Вопросы для самопроверки

1. Что представляет собой обобщенная водохозяйственная характеристика водохранилища?
2. Какие Вы знаете приемы расчета ее в зонах сезонного и многолетнего регулирования стока?
3. Объясните асимптотичность зависимости  $Q_{\text{гпр}} = f(V_{\text{полз}})$  в зоне многолетнего регулирования стока.

## Глава 11. ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

### 11.1. Определение и задачи

Если в составе гидроузла имеется гидроэнергетическая установка (ГЭУ), то помимо водохозяйственных расчетов, направленных на определение параметров водохранилища и режима его работы, производятся водноэнергетические расчеты. ГЭУ преобразует механическую энергию падающей воды в электрическую на гидравлических (ГЭС), гидроаккумулирующих (ГАЭС) и приливных (ПЭС) электростанциях при их работе в турбинном режиме или преобразуют электрическую энергию в механическую энергию подъема воды на насосных станциях (НС), а также на ГАЭС и ПЭС при их работе в насосном режиме. Для использования энергии потока необходимо в месте постройки ГЭС и ее разновидности ГАЭС создать напор  $H$  – разность уровней воды выше и ниже ГЭС или разность уровней между верхним и нижним бассейнами для ГАЭС. Для ПЭС напор определяется по разности уровней воды в бассейне и море.

Под водноэнергетическими расчетами понимают совокупность операций, выполняемых для определения выработки электроэнергии на ГЭС в условиях разной водности потока применительно к различным параметрам гидроузлов и водохранилищ (при проектировании) и правилам использования водных ресурсов (как при проектировании, так и при эксплуатации).

Целью водноэнергетических расчетов является: определение основных показателей и режимов работы ГЭС при различных параметрах гидроузла и при заданных графиках отдачи станции по мощности  $N_{\text{экс}}(t)$  расходу нижнего бьефа  $Q_{\text{н.б.}}(t)$  или уровням бьефов – верхнего  $Z_{\text{в.б.}}(t)$  и нижнего  $Z_{\text{н.б.}}(t)$ ; составление многолетней характеристики режима работы гидроузла при выбранных в результате технико-экономических расчетов параметрах. Такая характеристика составляется в виде хронологической последовательности и вероятностной характеристики изменения расходов воды и уровней в верхнем и нижнем бьефах гидроузлов, напоров, мощностей и выработки электроэнергии на ГЭС.

Основными водноэнергетическими показателями ГЭС считаются мощности ГЭС – гарантированная (обеспеченная)  $N_{\text{гар}}$  ( $N_{\text{р}}$ ) и располагаемая  $N_{\text{расп}}$ , а также средняя многолетняя годовая выработ-

ка электроэнергии  $\mathcal{E}_r$ . *Гарантированной, или обеспеченной, мощностью* ГЭС  $N_{\text{гар}}(N_p)$  называется минимальная среднемесячная, среднесезонная или среднегодовая мощность, которую ГЭС обеспечивает с заданной надежностью. В проектной практике в качестве гарантированной мощности ГЭС используется либо среднемесячная, либо средняя за всю межень или только за осенне-зимний период, либо среднегодовая. *Располагаемая мощность* ГЭС представляет собой максимальную мощность ГЭС, соответствующую располагаемому напору, к. п. д. и полной пропускной способности турбин ГЭС при этом напоре. Мощность ГЭС в киловаттах в каждый момент времени

$$N_{\text{ГЭС}} = 9,81 \eta_r \eta_g Q_{\text{ГЭС}} H_{\text{нетто}}, \quad (11.1)$$

где  $Q_{\text{ГЭС}}$  – расход воды, используемый ГЭС для получения электроэнергии, т.е. расход воды, пропускаемый через турбины ГЭС, м<sup>3</sup>/с;  $H_{\text{нетто}}$  – полезный напор нетто, определяемый разностью уровней верхнего и нижнего бьефов с учетом гидравлических потерь в водопроводящих сооружениях, м;  $\eta_r$  – коэффициент полезного действия (к.п.д.) турбины,  $\eta_g$  – к. п. д. генератора. Коэффициент полезного действия гидротурбины зависит от ее мощности, конструкции, диаметра рабочего колеса, изменения напоров. Для средних и крупных гидротурбин с диаметром рабочего колеса 1 – 10 м наибольший к. п. д. достигает значений 0,89 – 0,95; для гидрогенераторов в зависимости от их мощности к. п. д. колеблется в пределах 0,92 – 0,98.

Если в формуле (11.1) коэффициенты 9,81  $\eta_r$ ,  $\eta_g$  заменить одним коэффициентом  $K_M$ , то средние значения коэффициента  $K_N$  для ГЭС с крупными и средними гидроагрегатами составят 8,2 – 8,8, для больших гидроагрегатов (мощностью до 5 тыс. кВт)  $K_N$  равно 7,8 – 8,0, а для уникальных  $K_N$  увеличивается до 8,9 – 9,1.

Таким образом, мощность ГЭС, отдаваемая с шин генератора,

$$N_{\text{ГЭС}} = K_N Q_{\text{ГЭС}} H_{\text{нетто}}. \quad (11.2)$$

Суммарной характеристикой работы ГЭС за какой-то период является выработка электрической энергии  $\mathcal{E}$ :

$$\mathcal{E} = \bar{N}T, \quad (11.3)$$

где  $\mathcal{E}$  – выработка электрической энергии, кВт·ч;  $T$  – число часов работы ГЭС;  $\bar{N}$  – средняя мощность в интервале  $T$ .

Так, годовая выработка электроэнергии (в среднем за многолетие)  $\bar{E}_r = 8760 \bar{N}$ , где  $\bar{N}$  – среднегодовая (за многолетие) мощность, кВт: 8760 – среднее число часов в году.

Как следует из формулы (11.2), мощность ГЭС при среднем значении  $K_N$  зависит от расхода воды и напора. Используемые на ГЭС расходы воды зависят от режима водотока, характера осуществляемого водохранилищем регулирования стока и пропускной способности гидроагрегата. Напоры же зависят от положения уровней воды верхнего и нижнего бьефов. Уровень верхнего бьефа  $Z_{в.б.}$  определяется наполнением водохранилища и характером кривой объемов водохранилища. Уровень нижнего бьефа  $Z_{н.б.}$  является функцией расхода воды в нем  $Q_{н.б.}$  и определяется характером кривой  $Q = f(Z_{н.б.})$ , подпором от ледяных образований и от нижележащей установки, с учетом неустановившегося движения потока.

Расход  $Q_{н.б.}$  в любой момент времени  $t$  определяется на основе следующего балансового соотношения:

$$Q_{н.б.}(t) = Q_{влхр}(t) + Q_{х.сбр}(t) + Q_{ф}(t) + Q_{шл}(t), \quad (11.4)$$

где  $Q_{влхр}$  – полезно используемая водоотдача из водохранилища, например расход воды через ГЭС;  $Q_{х.сбр}$  – холостые сбросы воды;  $Q_{ф}$  – расходы воды на фильтрацию через тело плотины и неплотность гидромеханических затворов;  $Q_{шл}$  – расходы воды на шлюзование, если в составе водохозяйственного комплекса имеется шлюз.

В зимний период ниже ГЭС создается полынья, длина которой зависит от температуры сбрасываемой воды из водохранилища, а иногда и от промышленных стоков предприятий. Несмотря на наличие ее зависимость  $Q = f(Z_{н.б.})$  не отвечает летним условиям, так как кромка льда создаст подпор зимних уровней, распространяющийся, как правило, до створа ГЭС. Зная длину полыньи и степень уменьшения пропускной способности русла у кромки льда, оцениваемую зимним коэффициентом  $K_{з, кр} = Q_z / Q_n$  ( $Q_z$  и  $Q_n$  – соответственно, зимний и летний расходы при одном и том же уровне), с помощью методов речной гидравлики нетрудно рассчитать  $K_{з, гж}$  в створе ГЭС. С использованием  $K_{з, гж}$ , характеризующего уменьшение пропускной способности русла за счет подпора от кромки льда, по связи  $Q = f(Z_{н.б.})$  для летних условий и  $Q_{н.б.}$  определяется уровень нижнего бьефа зимой  $Z_{н.б.з}$ . При этом  $Z_{н.б.з}$  снимается с летней кривой  $Q = f(Z_{н.б.})$  по фиктивному летнему расходу  $Q_{ф.л.} = Q_{н.б.} / K_{з, гж}$ .

В обобщенных расчетах  $N_{\text{гар}}$  и  $\bar{\mathcal{E}}_r$  рассчитываются по формулам:

$$N_{\text{гар}} = K_N H_{\text{нетто}} (\alpha \bar{Q}_r - q), \quad (11.5)$$

$$\bar{\mathcal{E}}_r = 8760 K_N H_{\text{нетто}} (\eta \bar{Q}_r - q), \quad (11.6)$$

где  $N_{\text{гар}}$  – гарантированная мощность, кВт;  $\bar{\mathcal{E}}_r$  – средняя многолетняя годовая выработка электроэнергии, кВт·ч;  $\bar{Q}_r$  – средний многолетний годовой сток м<sup>3</sup>/с;  $q$  – потери стока в основном на испарение с водной поверхности водохранилища, м<sup>3</sup>/с;  $\alpha$  – коэффициент регулирования стока, или водоотдача брутто из водохранилища в долях среднего многолетнего годового стока;  $\eta$  – коэффициент, характеризующий степень использования водных ресурсов, представляет собой долю среднего многолетнего стока, используемую на ГЭС, т.е. пройденную через турбины ГЭС. При этом коэффициент  $\alpha$  определяется по обобщенной водохозяйственной характеристике водохранилища (см. рис. 10.1) в зависимости от располагаемого или заданного полезного объема ( $V_{\text{плз}}$ ). Коэффициент  $\eta$  зависит от коэффициента  $\alpha$  (или от  $V_{\text{плз}}$ ) и максимальной пропускной способности ГЭС (при  $N_{\text{уст}}$ )  $Q_{\text{в}}$ . Его при обобщенных предварительных расчетах можно определять по специально разработанной номограмме, представляющей собой зависимость коэффициента  $\eta = Q_{\text{исп}} / \bar{Q}_r$  от коэффициента турбинного расхода  $\delta = N_{\text{уст}} / N_{\text{гар}}$  и коэффициента  $\alpha = Q_{\text{гар}} / \bar{Q}_r$ , приведенную в удобном масштабе в [7].

## 11.2. Роль гидроэлектростанций в энергосистемах и их участие в покрытии графиков нагрузки

Совокупность электрических станций, подстанций и потребителей электроэнергии, связанных между собой линией электропередачи и электрическими сетями, носит название *электроэнергетической системы*. Если при этом на части тепловых электростанций (ТЭЦ) производится и тепловая энергия, которая по тепловым сетям передается потребителям тепла, то такая система называется *энергетической (энергосистемой)*.

Сумма потребностей в электроэнергии всех потребителей энергосистемы в данный момент является ее нагрузкой. Кривая изменения нагрузки во времени  $P(t)$  называется *графиком нагрузки*. В планировании и управлении режимами энергосистемы наибольшее

распространение имеют суточные недельные и годовые графики нагрузки. Графически они могут изображаться плавной ломаной или ступенчатой кривой. В зависимости от характера потребителей электроэнергии форма их будет различна. При одном и том же составе потребителей они будут различными и в зависимости от времени года. Для большинства районов России в зимнее время за счет возрастающей бытовой нагрузки общая за сутки нагрузка системы выше, чем в летнее. Аналогичная картина и в экстремальных значениях нагрузки (максимальная нагрузка в зимние сутки, а минимальная – в летние). На рис. 11.1 изображен плановый типичный для зимних рабочих дней центра Европейской части России суточный график нагрузки. Суточный график нагрузки характеризуется в основном тремя показателями: максимальной суточной нагрузкой  $P_{\max}$ , минимальной суточной нагрузкой  $P_{\min}$  и среднесуточной нагрузкой  $\bar{P}_{\text{сут}}$ , определяемой путем деления суточной выработки энергосистемы на 24 ч. Та часть графика нагрузки, которая занимает зону от оси абсцисс до  $P_{\min}$ , носит название *базисной (базисной)*, соответственно, зона от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$  – *пиковой*. Иногда зона от  $P_{\min}$  до  $\bar{P}_{\text{сут}}$  называется *полупиковой*.

Плотность графика нагрузки, его конфигурация характеризуется двумя коэффициентами: коэффициентом заполнения (полноты, плотности)  $\gamma = \bar{P}_{\text{сут}} / P_{\max}$  представляющим собой отношение среднесуточной нагрузки к максимальной; коэффициентом минимума (неравномерности)  $\beta = P_{\min} / P_{\max}$ , представляющим собой отношение минимальной нагрузки к максимальной.

Базисная часть нагрузок энергосистемы покрывается в основном тепловыми электростанциями, а пиковая – гидроэлектростанциями.

Неравномерная работа тепловых и атомных станций нецелесообразна по ряду причин: длительный процесс введения агрегата в работу, дополнительные неэкономичные затраты топлива, снижение к. п. д. оборудования и т.д. Этих недостатков ГЭС не имеет. Для нее практически безразлично, какую часть графика нагрузки покрывать, так как ввод гидроагрегата производится в течение 3 – 5 мин.

Работая в пике графика нагрузки, ГЭС покрывает значительную его высоту (мощность) за счет полной или частичной остановки в часы провала графика нагрузок. Разгрузку ГЭС в ночные часы и накопление в водохранилище избытков притока возможно произ-

водить только при совместной работе с тепловыми станциями, покрывающими базисную часть графика нагрузки. При изолированной работе ГЭС, когда мощностью ее покрывается и базисная часть, участие ГЭС в пиковой зоне несколько ограничено.

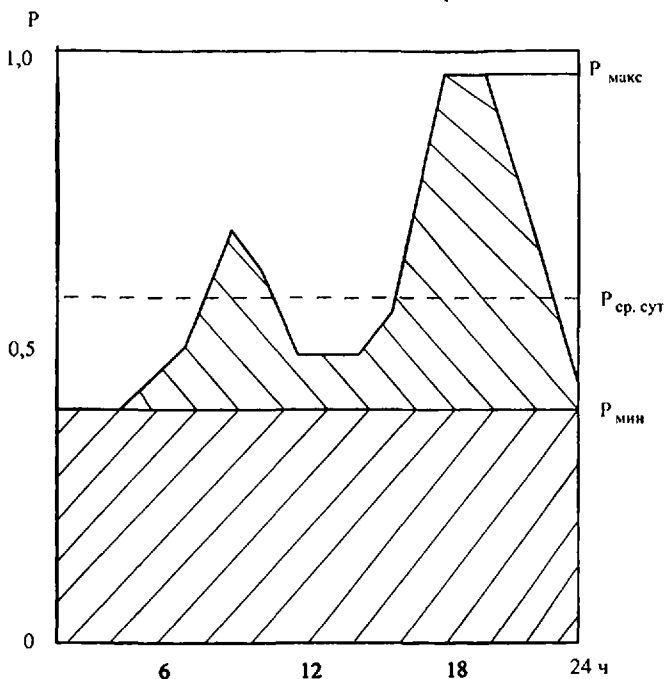


Рис. 11.1. Типичный график нагрузки центра Европейской части России для зимних рабочих дней.

В многогодные годы и сезоны ГЭС целиком или частично переводится на равномерную в течение суток работу для покрытия базисной части графика нагрузок. При этом для покрытия пиковой части обычно необходима лишь часть тепловых агрегатов, а остальные отключаются на длительное время. В результате такой взаимозаменяемости функций гидроэлектростанции и тепловой станции экономится топливо, повышается эффективность использования притока и в целом улучшаются энергоэкономические показатели тепловых и гидравлических станций.

В случае отсутствия или недостаточности бассейна суточного регулирования ГЭС, а также в целях улучшения режимов работы тепловых блоков строятся гидроаккумулирующие установки (ГАЭС).

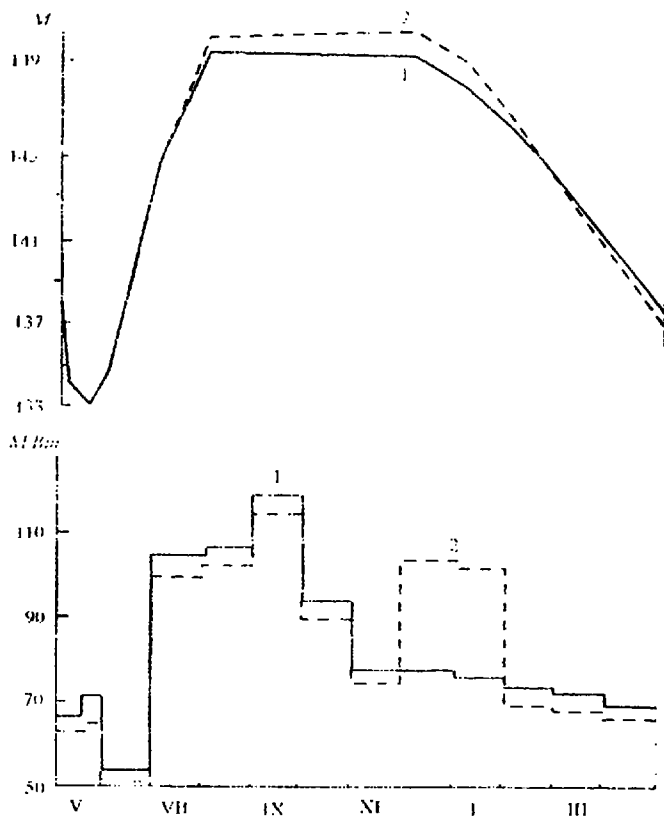


Рис. 11.2. График изменения мощностей ГЭС и уровней водохранилища при изолированной (1) работе ГЭС и при ее совместной (2) работе с ГЭС.

Потребляя электроэнергию из сети в часы низких (ночных) нагрузок для закачки воды из нижнего бассейна в верхний и отдавая ее в часы пиков нагрузки, ГАЭС создает дополнительную мощность, а заодно выравнивает режим тепловых станций.

В связи с двойным преобразованием энергии к. п. д. ГАЭС сравнительно невелик (0,50 – 0,65), т.е. в сеть возвращается 50 –

65% энергии, взятой из сети в часы провала нагрузки. Но, учитывая, что возвращается в сеть пиковая мощность, строительство ГАЭС в ряде случаев оправдано.

Таким образом, гидравлические станции (ГЭС – ГАЭС), выгодно дополняя работу ТЭС – АЭС, повышают экономичность, оперативность и надежность работы энергосистем.

В настоящее время в России разрабатываются проекты создания «энергетических ансамблей», состоящих из традиционных и нетрадиционных источников энергии, например ГЭС – ПЭС. В них главенствующая роль отводится также ГЭС. ПЭС, преобразуя энергию приливов и отливов в электрическую, имеют достаточно ровный график выдачи электроэнергии в течение года. Это не увязывается с графиком годовых нагрузок энергосистемы. Перераспределить энергоотдачу ПЭС в соответствии с графиком нагрузки возможно только с помощью водохранилища ГЭС. При этом в период пониженных нагрузок энергоотдача ГЭС снижается на размер энергоотдачи ПЭС и избытки притока (энергии) накапливаются в водохранилище. В период максимума нагрузок накопленные избытки срабатываются. На рис. 11.2 приведены мощности ГЭС и уровни водохранилища в условиях изолированной работы ГЭС и при ее совместной работе с ПЭС на примере одного из северных энергетических комплексов.

Среди электрических станций (ТЭС, АЭС, ГЭС, ГАЭС и др.), работающих в составе Единой энергосистемы России, следует отметить значительные преимущества гидроэлектростанций (ГЭС), а именно:

- не выделяют никаких вредных веществ;
- используют природно-возобновляемый энергоноситель, не требующий транспортных услуг;
- себестоимость электроэнергии в 6 – 8 раз ниже, чем на ТЭС и АЭС;
- требуют в 6 – 12 раз меньше персонала, чем на ТЭС;
- эксплуатационная надежность;
- высокоманевренный источник;
- быстрая полная загрузка;
- лучшие социальные условия труда;
- позволяют сохранить органическое топливо для будущих поколений;

– эксплуатация всех ГЭС России за счет предотвращения вредных выбросов позволяет избежать 18 – 34 тысячи дополнительных смертей в стране.

### 11.3. Характеристика гидросилового оборудования ГЭС и понятие установленной мощности

Условия и режим работы ГЭС во многом зависят от эксплуатационной характеристики гидроагрегатов (рис. 11.3). Кривая пропускной способности агрегата подсчитывается, исходя из максимальной мощности агрегата (турбины и генератора), по формуле

$$Q_a = \frac{N_a}{9,81\eta_T\eta_G H_{\text{нетто}}} = \frac{N_a}{K_N H_{\text{нетто}}}, \quad (11.7)$$

где  $H_{\text{нетто}}$  – напор нетто.

Мощность агрегата определяется по его эксплуатационным характеристикам, представленным на рис. 11.3.

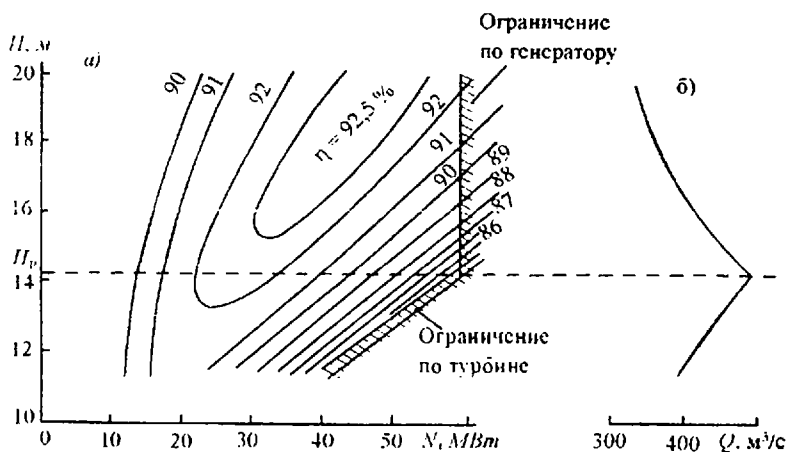


Рис. 11.3. Эксплуатационная характеристика гидроагрегата (а) и кривая его пропускной способности (б).

Суммарный расход через ГЭС равен  $Q_{\text{ГЭС}} = Q_a n$ , где  $n$  – количество установленных на ГЭС агрегатов.

Наряду с изображением к. п. д. агрегата при разных сочетаниях  $H$  и  $N$  или  $H$  и  $Q$  на характеристике гидроагрегата показаны две ли-

нии ограничений: 1) ограничение по мощности турбины (нижний скошенный край диаграммы), указанная линия соответствует полному открытию направляющего аппарата турбины, поэтому мощности при напорах ниже расчетного  $H_p$  называются *располагаемыми*; 2) ограничение по мощности генератора (правый угол диаграммы, срезанной вертикальной линией). Мощность турбины ограничивается параметрами генератора. На расходной характеристике эта линия становится наклонной, так как расходы с повышением напоров при постоянной мощности уменьшаются.  $H_p$  – расчетный напор, наименьший напор, при котором используется полная мощность турбины и генератора и которому соответствует максимальная пропускная способность турбины (ГЭС).

Установленная мощность ГЭС  $N_{уст}$  лимитируется максимальной мощностью генератора:

$$N_{уст} = N_r n,$$

где  $N_r$  – максимальная мощность генератора,  $n$  – число установленных генераторов.

Характеристикой использования установленной мощности электростанции является так называемое *число использования* ее  $T_{уст}$ , равное отношению годовой выработки энергии  $\mathcal{E}_r$  к установленной мощности  $N_{уст}$ :  $T_{уст} = \mathcal{E}_r / N_{уст}$ .

#### 11.4. Водноэнергетические расчеты по календарным стоковым рядам

Для составления многолетней характеристики режима работы ГЭС при выбранных в результате технико-экономических расчетов параметров водохранилища и ГЭС одновременно с водохозяйственными расчетами проводятся водноэнергетические расчеты по имеющемуся гидрологическому ряду или его расчетному периоду. Для этого табл. 8.3, в форме которой выполняются водохозяйственные расчеты, дополняется графами, в которых дается характеристика напоров и мощностей ГЭС в  $i$ -м расчетном интервале времени.

Блок водноэнергетических расчетов дан в табл. 11.1.

Основными исходными данными для подобных расчетов являются:

– календарная последовательность естественных расходов воды, средних за принятые расчетные интервалы времени, за весь или часть периода наблюдений;

– морфометрические характеристики водохранилища в виде кривых зависимостей статических площадей зеркала и объемов от уровней воды  $F = f(Z_{в.б.})$  и  $V = f(Z_{в.б.})$  или динамических объемов от уровней и расходов воды  $V = f(Q, Z_{в.б.})$ ;

– семейство кривых связей расходов и уровней воды  $Q = f(Z)$  в верхнем и нижнем бьефах ГЭС – «елочка» кривых в естественных условиях в пределах от верхней границы влияния подпора водохранилища до нижней границы зоны влияния суточного и недельного регулирования мощности ГЭС;

– характеристика гидроагрегатов в виде зависимостей от напора их коэффициентов полезного действия, мощностей и расходов воды, а также характеристика потерь напора.

Таблица 11.1

Водноэнергетические расчеты гидроузла за период с мая 1903 по апрель 1980 г. (графы даются в продолжение граф табл. 8.3)

Средний уровень нижнего бьефа, $\bar{Z}_{н.б.i}$ , м	Напор, м			Мощность, МВт	
	брутто $H_{бр.i} = \bar{Z}_{в.б.} - \bar{Z}_{н.б.}$	потери $h_{п.}$	$H_{нетто i}$	по водотоку	с ограничением по $N_{вет}$
323,9	190,8	3,2	187,6	2080	2080
323,9	195,0	3,2	191,8	2080	2080
...	...	...	...	...	...

Все водохозяйственные и водноэнергетические расчеты проводятся применительно к определенным правилам управления водными ресурсами водохранилищ, исходя из обеспечения постоянной гарантированной мощности ( $N_{гар}$ ). При неизвестном наполнении водохранилища на конец расчетного интервала времени  $\Delta t_i$ , а следовательно, и напора  $H_i$ , расчеты проводятся методом последовательного приближения (подбора). Подбор значений всех элементов режима работы водохранилища и ГЭС в каждом интервале  $i$  при известных  $\bar{Q}_{сет i}$ ,  $V_{нач i}$  и  $Z_{в.б.}$  производится в следующем порядке:

– задаются значения  $Q_{ГЭС i}$ ;

– определяются  $\Delta Q_{акк i}$ ,  $\Delta V_{акк i}$ , наполнение водохранилища на конец  $i$ -го интервала времени,  $V_{i+1}$ ,  $Z_{в.б.(i+1)}$ ,  $\bar{Z}_{в.б.i}$ ,  $\bar{Z}_{н.б.i}$ ,  $H_{бр.i}$ ,  $h_{п.i}$ ,  $H_{нетто i}$ ;

– рассчитывается новое значение  $\bar{Q}_{ГЭС i}$  по выражению  $Q_{ГЭС i} = N_{гар} / (K_N \bar{H}_{нетто i})$  и сравнивается с заданным значением  $\bar{Q}_{ГЭС i}$ ;

– при их совпадении расчет в данном интервале  $i$  заканчивается и начинается в интервале  $i + 1$ ; при различии значений  $\bar{Q}_{ГЭС}$  (заданного и расчетного), т.е. по существу при различии значений  $N_i$  и  $N_{г\text{ар}}$ , начальное значение  $\bar{Q}_{ГЭС}$   $i$  изменяется и расчет повторяется до полного совпадения начального и расчетного их значений. При определении  $\bar{Z}_{н.б}$  необходимо учитывать не только подпор от кромки льда в зимний период, но и кратковременные повышения уровней, связанные с суточным регулированием мощности ГЭС. Определение  $\bar{Z}_{н.б}$  по среднеинтервальным расходам ГЭС ( $Q_{ГЭС}$   $i$ ) приведет к занижению их, а следовательно, к завышению напоров и соответствующей энергоотдачи ГЭС.

Для учета суточных колебаний уровней в нижних бьефах ГЭС рекомендовано много способов. Наиболее простым и достаточно надежным является способ, используемый в практике Ленгидропроекта, который сводится к нахождению уровней нижнего бьефа по кривой  $Q = f(Z_{н.б})$ , соответствующих средневзвешенному расходу  $Q_{ср.взв}$ :

$$Q_{ср.взв} = \sqrt[3]{(Q_1^3 T_1 + Q_2^3 T_2) / (T_1 + T_2)}, \quad (11.8)$$

где  $Q_1$  – максимальный расход ГЭС при работе в пике графика нагрузки ( $80 - 85\% N_{уст}$ );  $T_1$  – продолжительность работы ГЭС на пике графика нагрузки;  $Q_2$  – минимальный расход при суточном регулировании (базовый);  $T_2$  – продолжительность работы ГЭС базовым расходом (ночной и дневной провалы нагрузок). Из практики проектирования известно, что  $Q_{ср.взв} = (0,7 - 0,8) Q_{макс}$ , где  $Q_{макс}$  – максимальный расход ГЭС при работе ее в пике графика нагрузки.

Весной, когда  $Q_{зар} > Q_{ср.взв}$ ,  $Z_{н.б}$  определяется соответствующими  $Q_{зар}$ . Водохозяйственные и водноэнергетические расчеты по длительным водохозяйственным годам проводятся с использованием современных вычислительных средств. Блок-схема одной из возможных вычислительных программ дана на рис. 13.2.

По данным регулирования за длительный период строят хронологические графики наполнений водохранилища, естественных и зарегулированных расходов (с выделением расходов ГЭС), а также напоров и мощностей ГЭС, вид которых по характерным (по водности) годам дан на рис. 11.4.

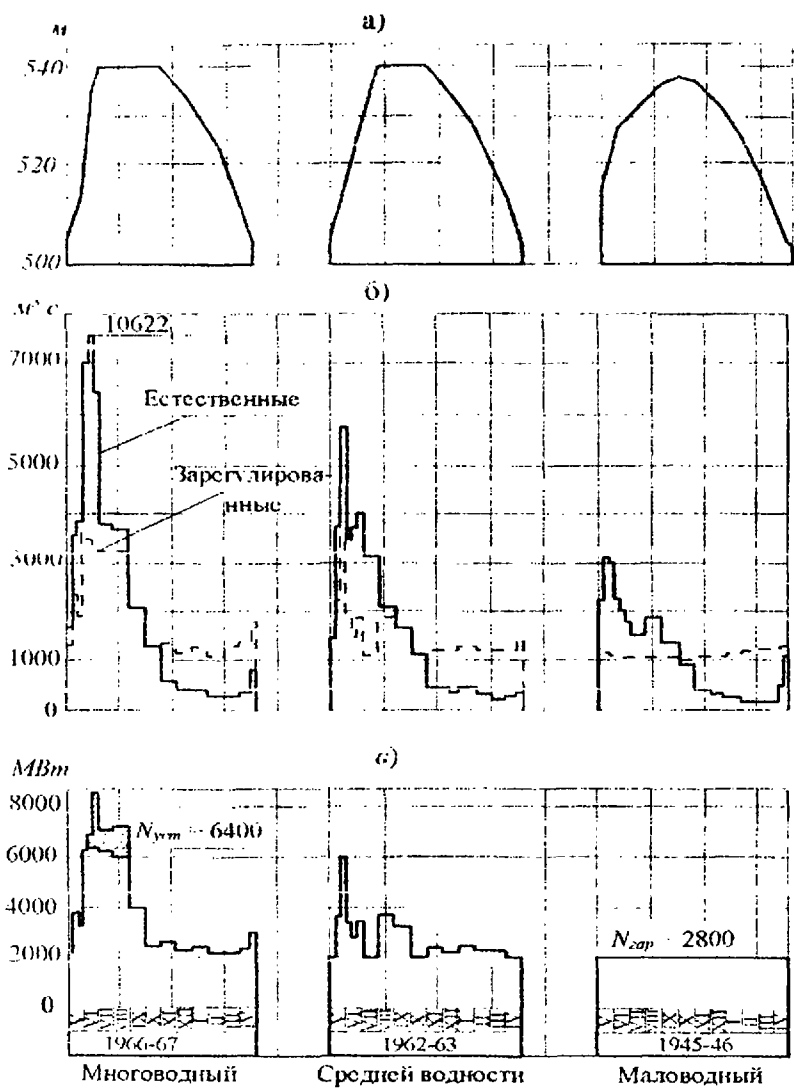


Рис. 11.4. Хронологические графики уровней водохранилища (а), расходов воды (б) и мощностей ГЭС (в) за характерные по водности годы.

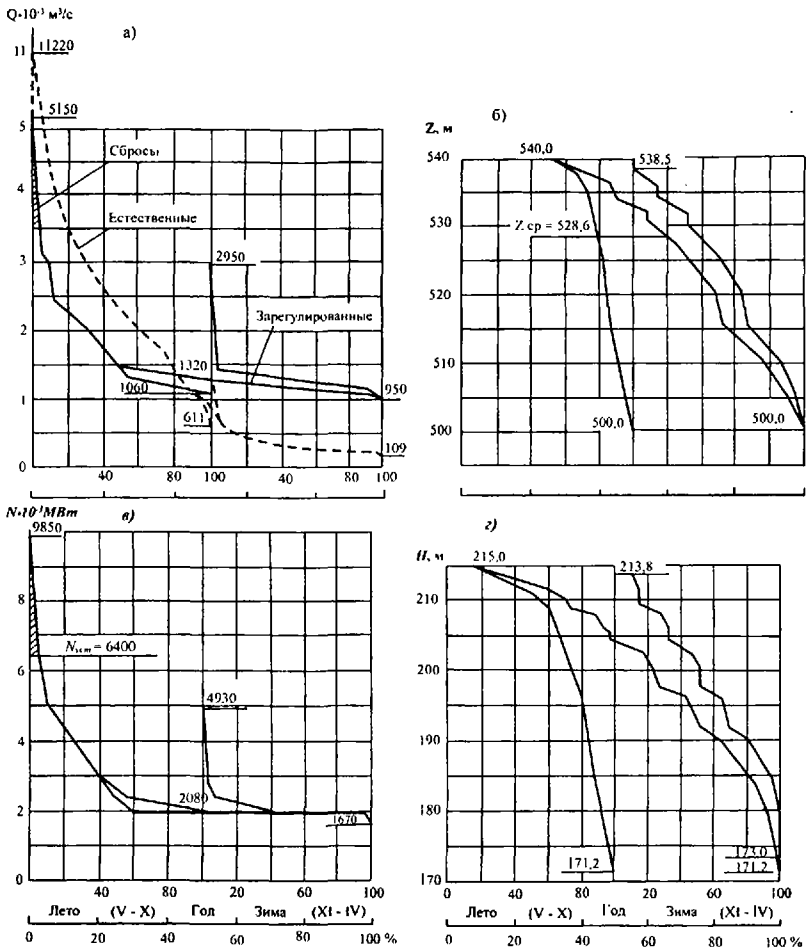


Рис. 11.5 Кривые продолжительности основных характеристик зарегулированного режима гидроузла за период с 1908–09 по 1966–67 г.

*а* – расходы воды, *б* – уровни воды в водохранилище, *в* – мощности, *г* – напоры

Для характеристики режима работы водохранилища и ГЭС часто прибегают к подсчету и построению кривых продолжительности

уровней воды в водохранилище (на начало или конец интервала), естественных и зарегулированных расходов, а также напоров и мощностей ГЭС. Продолжительность, как правило, выражается в процентах (рис. 11.5). По результатам табличных расчетов регулирования стока производится подсчет средней многолетней годовой выработки электроэнергии за длительный расчетный ряд лет

$$\bar{\mathcal{E}}_r = (730,5 \Sigma N_i) / n, \quad (11.6)$$

где  $\bar{\mathcal{E}}_r$  – средняя многолетняя годовая выработка электроэнергии, кВт·ч;  $\Sigma N_i$  – сумма средних месячных мощностей за весь расчетный период (за целое число водохозяйственных лет), кВт; 730,5 – среднее число часов за месяц;  $n$  – число лет периода.

Если в формулу подставить  $\Sigma N_i$  по водотоку, то получим годовую выработку электроэнергии по водотоку  $\bar{\mathcal{E}}_{г. \text{вод}}$ , а если подставить  $\Sigma N_i$  с ограничением по  $N_{уст}$  – годовую выработку электроэнергии ГЭС –  $\bar{\mathcal{E}}_{г. \text{ГЭС}}$ . При этом коэффициент использования стока на ГЭС  $\eta = \bar{\mathcal{E}}_{г. \text{ГЭС}} / \bar{\mathcal{E}}_{г. \text{вод}}$ .

### 11.5. Особенности обоснования параметров малых ГЭС и ГЭС с нерегулируемыми водохранилищами

При отсутствии регулирующего объема водохранилища, когда установка работает при постоянном подпертом верхнем бьефе, регулирование мощности ГЭС производится по водотоку. Если расход воды через турбину меньше расхода водотока, вода будет бесполезно сливаться через водосливы. Если же расход водотока меньше расхода воды через турбину – происходит снижение располагаемой мощности ГЭС.

В качестве исходной гидрологической информации для рассматриваемого случая будет выступать кривая продолжительности ежедневных расходов воды в створе ГЭС, приведенная для примера на рис. 11.6. Методы обоснования параметров малых ГЭС и ГЭС с нерегулируемыми водохранилищами разработаны пока недостаточно. Есть определенные наработки в проектных институтах. Рассмотрим в качестве примера, расчет среднемноголетней годовой выработки энергии ( $\mathcal{E}_r$ ) для одной из проектируемых ГЭС с нерегулируемым водохранилищем по кривой продолжительности ежедневных расходов воды (рис. 11.6).

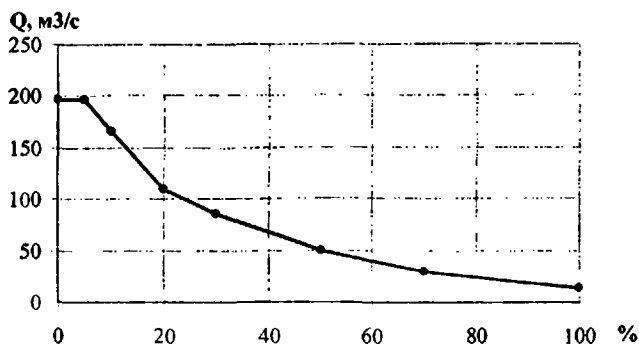


Рис. 11.6. Кривая продолжительности ежедневных расходов воды в створе ГЭС.

Исходные данные: НПУ – 665 м,  $N_{уст} = 100$  МВт, потери стока –  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ , потери напора  $h = 2,0$  м, пропускная способность ГЭС (нето) –  $160 \text{ м}^3/\text{с}$ , коэффициент мощности  $K_N = 8,5$ .

Расчет  $\bar{E}_r$  проводится в форме табл. 11.2.

Таблица 11.2

Расчет среднегогодовой выработки энергии ГЭС с нерегулируемым водохранилищем

$p, \%$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$\Delta p$		$Z_{н.б}$	$H_{\text{нето}} = Z_{\text{НПУ}} - Z_{н.б} - h_{п}, \text{ м}$	$Q_{\text{ГЭС,нето}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$N_{\text{ГЭС}}, \text{ кВт}$	$\Delta E, \text{ млн. кВт ч}$
		%	час					
5	196	5	438	592,2	70,8	160	96288	42,2
10	166	5	438	591,9	71,1	160	96696	42,3
20	110	10	876	591,5	71,5	109	66245	58,0
30	85,0	10	876	591,2	71,8	84	51265	44,9
50	49,0	20	1752	590,9	72,1	48	29417	51,5
70	30,0	20	1752	590,7	72,3	29	17822	31,2
100	13,4	30	2628	590,5	72,5	12,4	7642	20,1
$\Sigma^*$	5742	100	8760			5442		290,2
Среднее	57,42					54,42		

$$\Sigma^* = 196 \cdot 5 + 166 \cdot 5 + 110 \cdot 10 + 85 \cdot 10 + 49 \cdot 20 + 30 \cdot 20 + 13,4 \cdot 30 = 5742.$$

$$\Sigma^* = 160 \cdot 5 + 160 \cdot 5 + 109 \cdot 10 + 84 \cdot 10 + 48 \cdot 20 + 29 \cdot 20 + 12,4 \cdot 30 = 5442.$$

Мощность ГЭС:  $N_{\text{ГЭС}} = 8,5 \cdot Q_{\text{ГЭС,нето}} \cdot H_{\text{нето}}$ , а  $\Delta E = N_{\text{ГЭС}} \cdot \Delta p_{\text{ч}}$ .  
 Уровень нижнего бьефа  $Z_{н.б}$  определяется по кривой  $Q = f(Z_{н.б})$ .

Расход воды в створе ГЭС ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) снимается с кривой продолжительности ежедневных расходов воды на конец  $\Delta r$ . Казалось бы, правильнее определять  $Q$  по среднему расчетного интервала  $\Delta r$ . Но данная схема предполагает расчет  $\bar{E}_r$  с некоторым запасом, что важно на предпроектных стадиях. Точность расчета  $\bar{E}_r$  зависит от величины  $\Delta r$ . Если в данном случае  $\Delta r$  принять равным 5% (до 40% включительно), а свыше 40% принять  $\Delta r$  равным 10%, то  $\bar{E}_r$  определилась равной 310,2 млн. кВт·ч, т.е. ошибка по отношению к таблице (290,2 млн. кВт·ч) составила – 7%. Таким образом, увеличение  $\Delta r$  приводит к снижению  $\bar{E}_r$ .

По данным таблицы можно определить коэффициент использования стока на ГЭС –  $\eta_{\text{стока}}$ , который численно равен отношению среднего расхода через ГЭС –  $Q_{\text{ГЭС}}$  к среднему расходу воды водотока –  $Q_{\text{водотока}}$ . В нашем случае  $\eta_{\text{стока}} = Q_{\text{ГЭС}} / Q_{\text{водотока}} = 54,42 / 57,42 = 0,95$ .

Вторым водноэнергетическим параметром ГЭС является гарантированная выработка электроэнергии – минимальная выработка расчетной обеспеченности, которая принимается с учетом удельного веса ГЭС в энергосистеме. В данном примере с учетом малого удельного веса ГЭС расчетная обеспеченность принята 85%. По табл. 11.2  $E_{85\%} = 25,6$  млн. кВт·ч.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите основные водноэнергетические показатели ГЭС.
2. Что такое мощность ГЭС? От чего зависит ее размер?
3. Каковы факторы, влияющие на напор?
4. Какова роль ГЭС в покрытии графика нагрузки энергосистемы?
5. Назовите основные преимущества гидравлических электростанций перед тепловыми электростанциями.
6. Перечислите состав исходной информации для проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов.
7. Что такое коэффициент использования стока на ГЭС и от чего зависит его величина?
8. Как определяется выработка электроэнергии на малых ГЭС и ГЭС с нерегулируемыми водохранилищами?

## **Глава 12. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ И ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ**

Наряду с установлением основных параметров водохранилищ и соответствующих им водо- или энергоотдачи необходимо определить дополнительные характеристики режима работы гидроузла: первоначальное наполнение водохранилища в условиях различной водности; отдачу за пределами расчетной обеспеченности, т.е. в зоне наступления перебоев, и т.п.

### **12.1. Первоначальное наполнение водохранилища и режим работы ГЭС**

Для проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов в период первоначального наполнения водохранилища или так называемого периода временной эксплуатации гидроузла должны быть установлены сроки и темпы начального наполнения водохранилища, сроки ввода гидроагрегатов и их эксплуатационные характеристики в зоне пониженных напоров, а также пропускная способность туннелей или других водосбросных сооружений.

Интенсивность первоначального наполнения водохранилища и сроки пуска первых агрегатов ГЭС зависят от соотношения объемов водохранилища и речного стока, а также от заявок на воду отраслей хозяйства и особенно экологических попусков ниже створа гидроузла.

Эти расчеты выполняются, как правило, применительно к многоводным, средним и маловодным условиям. По многоводным условиям устанавливаются темпы роста подпорных сооружений, в средних по водности условиях определяется годовая выработка электроэнергии, а в расчетных маловодных условиях (90 или 95%-й обеспеченности) – годовая и месячные выработки (мощности), а также располагаемая по напору мощность ГЭС.

Расчеты первоначального наполнения водохранилища выполняются балансовым методом по календарным или смоделированным рядам расходов воды. При этом приток в водохранилище либо принимается таким же, как в характерные по водности годы и периоды, имевшие место в прошлом, либо моделируются применительно к серии лет заданной обеспеченности. Последний рекомендуется использовать для крупных водохранилищ, наполнение которых возможно осуществить лишь за несколько лет.

При моделировании теоретического маловодного периода 90 или 95%-й обеспеченности из  $n$  лет коэффициент изменчивости стока  $n$ -летия  $C_{vn}$  определяется по формуле С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля:

$$C_{vn} = \frac{C_{vr}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2r_1}{n(1-r_1)} \left( n - \frac{1-r_1^n}{1-r_1} \right)}, \quad (12.1)$$

где  $C_{vr}$  – коэффициент изменчивости годового стока в створе проектируемого сооружения;  $r_1$  – коэффициент корреляции между годовым стоком смежных лет, при  $r_1 = 0$  формула упрощается и приобретает вид

$$C_{vn} = \frac{C_{vr}}{\sqrt{n}}.$$

Годовой сток последнего года каждой  $n$ -летки ( $Q_n$ ) принимается равным суммарному стоку  $n$ -летки за вычетом стока предшествующих  $(n-1)$  лет, т.е.  $Q_n = Q_p \cdot n - Q_p \cdot (n-1)$ . Для примера в табл. 12.1 дан подсчет теоретического маловодного периода 95%-й обеспеченности.

Средневодный период в  $n$  лет представляет собой повторение средневодного года.

Таблица 12.1

**Подсчет теоретического маловодного периода 95%-й обеспеченности**

$Q_r = 3570 \text{ м}^3/\text{с}; C_{vr} = 0,15; r_1 = 0,3; C_s / C_v = 2$

Продолжительность периода наполнения $n$ лет	$C_{vn}$ по формуле (12.1)	Модульный коэффициент обеспеченностью 95% $K_{95\%}$	Средний расход воды обеспеченностью 95%		
			$n$ -летия $Q_{95\%} = Q_r \cdot K_{95\%}$	суммарный за $n$ -летие $Q_{95\%} \cdot n$	$n$ -го года $n$ -летия $Q_n = Q_{95\%} \cdot n - Q_{95\%} \cdot (n-1)$
1	0,15	0,77	2750	2750	2750
2	0,12	0,81	2890	5780	3030
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

Далее из ряда наблюдений за стоком отбирают годы со среднегодовыми расходами  $Q_i$ , близкими к  $Q_r$  и  $Q_n$ , а затем приводят их к  $Q_r$  и  $Q_n$  путем умножения среднемесячных расходов модели на соответствующие коэффициенты ( $K_{cp} = Q_r / Q_i$ ,  $K_n = Q_n / Q_i$ ).

Водохозяйственные и водноэнергетические расчеты в период первоначального наполнения по смоделированным рядам проводятся в форме табл. 12.2.

Таблица 12.2

Первоначальное наполнение водохранилища. Средневодные условия

Год	Месяц $\Delta t$	Расход, м <sup>3</sup> /с				Объем, км <sup>3</sup>		
		приток, $Q_{пр}$	ГЭС, $Q_{ГЭС}$	суммарный через ГЭС и водосброс, $Q_{сбр}$	аккумуляции, $Q_{акк} = Q_{пр} - Q_{сбр}$	аккумуляции, $V_{акк} = Q_{акк} \Delta t$	наполнения (на конец $\Delta t$ ) $V_k = \sum V_{акк}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1995	I	330	330	330	0	0	9,50	
	II	250	250	250	0	0	9,50	
	...	...	...	...	...	...	...	
	VI	20200	1200	6770	13430	35,33	60,29	
	...	...	...	...	...	...	...	
	X	1790	1890	1890	-100	-0,26	60,03	
	XI	630	1890	1890	-1260	-3,31	56,72	
XII	490	1890	1890	-1400	-3,68	53,06		
					и т.д.			

Уровень, м			Напор нетто $H_n = Z_{ср} - Z_{н.б.} - \Delta h$	$K_N$	Мощность $N = K_N Q_{ГЭС} H_{нетто}$ , МВт	Годовая выработка энергии Э, млрд. кВт·ч
водохранилища		нижнего бьефа $Z_{н.б.}$				
на конец $\Delta t, Z_k$	на середину $\Delta t, Z_{ср}$			12	13	14
80,00	80,00	16,0	61,00	8,10	163	
80,00	80,00	16,0	61,00	8,10	123	
...	...	...	...	...	...	
128,00	115,65	23,3	88,35	8,85	348	
...	...	...	...	...	...	
127,90	127,95	19,0	105,95	8,85	1772	
126,10	127,00	20,0	104,00	8,85	1739	
124,10	125,10	20,0	102,10	8,85	1707	7,87
			и т.д.			

Наполнение водохранилища ведется за счет избытков притока над водопотреблением из верхнего бьефа, попусками в нижний бьеф гидроузла и потерями воды из водохранилища, в том числе и разовых на насыщение водой подстилающих грунтов ложа и бортов водохранилища.

Пропуск половодий и паводков в период первоначального наполнения водохранилища изложен в гл. 15.

Из практики водохозяйственного проектирования известно, что длительность первоначального наполнения водохранилища измеряется в зависимости от объема водохранилища и предстоящих гидрологических условий днями, месяцами или годами.

### **12.2. Отдача из водохранилища за пределами расчетной обеспеченности**

За пределами расчетной обеспеченности отдачи (водо- или энергоотдачи) в связи со сработкой полезного объема водохранилища возможны перебои, т.е. снижение отдачи против гарантированной. Установление размера снижения отдачи (глубины перебоя) является чрезвычайно важной задачей водохозяйственных расчетов. При сезонном (годовом) регулировании отдача за пределами расчетной обеспеченности устанавливается на основе кривой обеспеченности межennaleго или годового естественного стока, так как наполнение и сработка водохранилища сезонного регулирования происходит в течение каждого года и на смежные годы влияния не оказывает.

При многолетнем регулировании, согласно исследованиям С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля, вероятность перебоя в смежном году повышается. В режиме водохранилищ с большой отдачей  $\alpha$  длительные периоды нормальной работы могут сменяться группами лет с ограниченной отдачей. Глубина перебоя (дефицит в гарантированной отдаче) бывает различной по перебойным годам и меняется от нуля до годовой отдачи брутто.

Во избежание глубоких перебоев водообеспечения участников водохозяйственного комплекса в закритических условиях (за пределами расчетной обеспеченности отдачи) в настоящее время производится регламентация требований к снижению водоотдачи по отношению к нормальной (обеспеченной) в перебойные годы. Так, в методических указаниях [39] рекомендуется в целях обеспечения нормальной работы отраслей хозяйства снижение обеспеченной водоотдачи в закритических условиях производить не более чем на 20 – 30%.

Для снижения глубины и продолжительности возможного перебоя в водоотдаче из водохранилища необходимо предусмотреть

дополнительный объем водохранилища. Практически дополнительный объем, необходимый для поддержания сниженной водоотдачи за пределами расчетной обеспеченности, можно оценить на основе формулы С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля для определения так называемой *приведенной обеспеченности*:

$$p' = p_{\text{норм}} + (p_{\text{сн}} - p_{\text{норм}}) \alpha_{\text{сн}} / \alpha_{\text{норм}}, \quad (12.2)$$

где  $p'$ ,  $p_{\text{норм}}$ ,  $p_{\text{сн}}$  – обеспеченности соответственно приведенной, нормальной и сниженной водоотдачи;  $\alpha_{\text{сн}}$  и  $\alpha_{\text{норм}}$  – водоотдача в долях нормы годового стока, соответственно нормальная и сниженная.

По заданным значениям снижения водоотдачи по отношению к  $\alpha_{\text{норм}}$  и его обеспеченности  $p_{\text{сн}}$  по формуле (12.2) определяют  $P'$ , а затем с известных номограмм по  $\alpha_{\text{норм}}$  и  $p'$  снимают объем водохранилища, необходимый для поддержания сниженной водоотдачи заданной обеспеченности.

#### ***Вопросы для самопроверки***

1. Цели и приемы расчетов первоначального наполнения водохранилища.
2. С какой целью определяются водо- и энергоотдача за пределами расчетной обеспеченности?
3. Почему возникает необходимость регламентировать величину снижения нормальной (обеспеченной) водоотдачи?
4. Как при этом определяется дополнительный полезный объем водохранилища?

## Глава 13. КАСКАДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

### 13.1. Общие положения

Совокупность гидроузлов, расположенных на одном водотоке или в одном бассейне, а также в разных бассейнах рек, но связанных единством водного режима, носит название *каскада установок*. Если в составе указанных гидроузлов имеются водохранилища, то данный каскад носит название *каскада водохранилищ*. Если кроме водохранилищ присутствуют гидроэлектростанции, то такая совокупность составляет *каскад ГЭС*.

Каскадное использование водотока способствует повышению эффективности использования водных ресурсов, но при этом энергетически может оказаться менее эффективным, чем использование гидроэнергетического потенциала всего водотока на одной ГЭС. Однако большая концентрация напора, особенно на равнинных реках, влечет за собой значительные затопления земель. Поэтому разбивка водотока и его притоков на несколько ступеней вполне оправдана экономически, с учетом топогеологических условий и требований охраны природной среды. Так, например, в «Докладе по использованию уникальных гидроэнергетических ресурсов бассейнов рек Енисея и Ангары», разработанном Ленгидропроектом, вместо одноступенной Средне-Енисейской ГЭС с НПУ = 137 м и расположенной ниже слияния рек Енисея и Ангары было предложено пять гидроэлектростанций (три на Енисее и две на Ангаре). При этом суммарная выработка электроэнергии пяти ГЭС снизилась по отношению к одноступенной схеме с НПУ = 137 м на 15%, а площадь затопления – на 70%. Количество переселяемого населения снизилось на 40%.

Условия работы каскадно расположенных водохранилищ отличаются от условий работы изолированных (одиночных) водохранилищ. Эти различия заключаются в следующем: суммарный используемый сток в створах, расположенных ниже по течению водохранилищ, уменьшается на объем потерь воды из водохранилищ, расположенных выше (испарение, отъемы воды на водоснабжение и орошение и т.д.), а также перераспределяется во времени, т.е. снижается в период половодья и повышен в период межени. Перераспределение стока вышерасположенными водохранилищами благоприятно сказывается на работе нижерасположенных водохранилищ,

так как в последних объем создается, как правило, только для частичного регулирования стока боковой приточности; при сомкнутых бьефах нижележащая установка подпирает вышерасположенную и тем самым оказывает влияние на ее напоры. В связи со взаимным влиянием работающих в каскаде установок определение их параметров и разработка режима эксплуатации производится в условиях их совместной работы.

При работе каскадов водохранилищ оптимальный порядок наполнения и сработки каждого из них должен ставиться в зависимость не только от запасов воды, содержащихся во всех водохранилищах, но и от распределения этих запасов между ними. Наиболее существенно порядок использования полезных объемов водохранилищ может сказаться на работе каскадов ГЭС, эффективность которых зависит от полноты использования не только объема воды, но и напора.

Теория работы каскадов и методика оптимизации их режима разработки пока недостаточно. Практически решение, по-видимому, не слишком далекое от оптимального, достигается при диспетчеризации работы установок последовательно, начиная с верхних ступеней. При этом обеспечивается наиболее эффективное использование каждой ступени в расчете на сток, поступающий с вышерасположенных установок в режиме, соответствующем требованиям, которые последовательно предъявляются к каждой из них.

Известны два вида каскадного регулирования стока: *независимое*, когда каждая установка рассматривается как самостоятельный источник, снабжающий водой или энергией определенных потребителей; *компенсирующее*, когда режим работы каждого составляется так, чтобы достигался наибольший суммарный эффект каскада. В целях получения водноэнергетического эффекта от каскадного регулирования, выраженного в повышении суммарных гарантированных (минимальных) расходов воды, мощности или выработки энергии по каскаду, в проектной практике принимается компенсирующее регулирование. При этом водноэнергетический эффект компенсирующего каскадного регулирования складывается из двух составляющих: 1) эффекта за счет асинхронности стока на разных реках бассейна, являющейся результатом несовпадения фаз колебаний стока основной реки и ее притоков или разных рек; 2) эффекта за счет компенсации боковой приточности и неустойчивой водо- или

энергоотдачи менее зарегулированных водохранилищами ГЭС на других водотоках попусками из водохранилищ-компенсаторов – собственно эффект компенсирующего регулирования.

С формированием крупных энергетических систем наблюдается объединение гидроэлектростанций и каскадов ГЭС с различной степенью регулирования и расположенных на реках с асинхронным режимом стока. Это создает водохозяйственные и гидрологические предпосылки для организации и проведения межбассейнового компенсирующего электрического регулирования (по проводам), смысл которого аналогичен каскадному компенсирующему регулированию.

Именно такой режим регулирования был предусмотрен при проектировании многих каскадов на Кольском полуострове и в Сибири. В табл. 13.1 даны гарантированные мощности Ангарского и Енисейского каскадов ГЭС, каскадов ГЭС Северо-Западного экономического района при их объединении.

Увеличение гарантированной мощности позволяет увеличить участие ГЭС полной мощностью в покрытии суточного графика нагрузки и тем самым повысить надежность энергоснабжения.

Таблица 13.1

**Увеличение мощности ГЭС при их объединении и организации межбассейнового компенсирующего регулирования**

ГЭС и их каскады	Суммарная гарантированная мощность расчетной обеспеченности, МВт		Увеличение мощности при совместной работе	
	при раздельной работе	при совместной работе	МВт	%
Ангарский и Енисейский каскады	9940	10 900	960	10
Каскады ГЭС Северо-Западного экономического района	1183	1274	91	8

### 13.2. Компенсирующее каскадное регулирование стока

Расчеты каскадного компенсирующего регулирования стока проводятся водобалансовым методом по наблюдаемым или смоделированным стоковым рядам.

Из-за большой трудоемкости и значительного числа операций расчеты каскадного регулирования стока проводятся с использованием ЭВМ. Например, одной из возможных является программа

«Бассейн», разработанная в Московском энергетическом институте на кафедре гидроэлектроэнергетики и возобновляемых источников (ГЭВИ). Блок-схема программы дана на рис. 13.1.

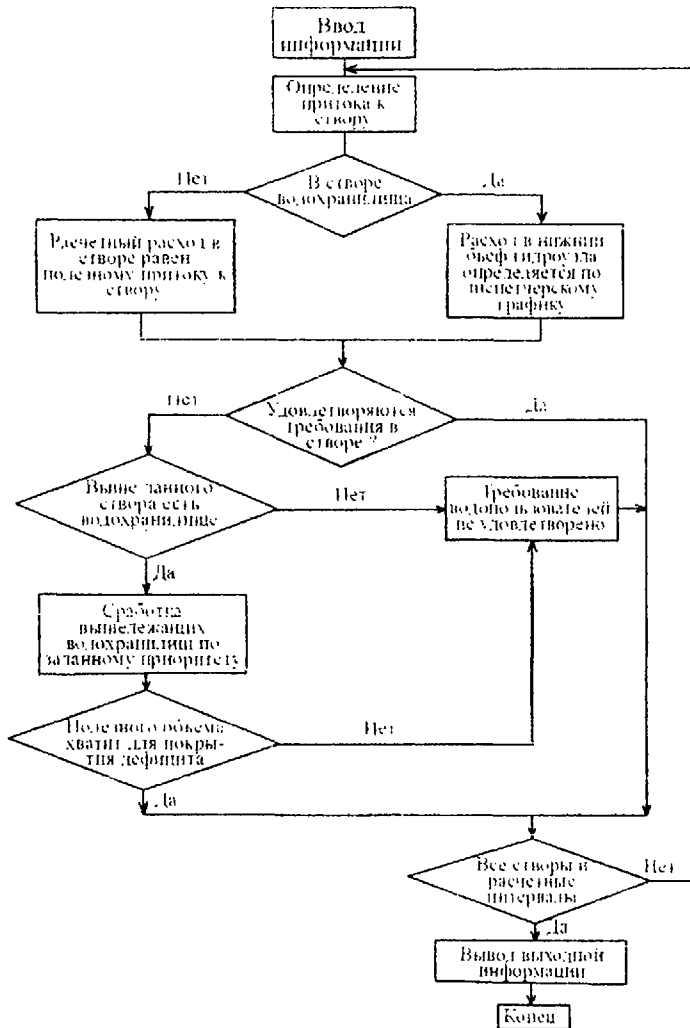


Рис. 13.1. Блок-схема программы «Бассейн».

Данная программа реализует календарный метод расчета регулирования стока. Все пространство бассейна каскада разбивается на расчетные створы, в которых определяются гидравлические характеристики режима рек и технические характеристики гидроузлов. В качестве основного уравнения математической модели каскада ГЭС используется уравнение водного баланса, записанное в следующем виде для  $i$ -го интервала расчета:

$$\bar{Q}_{\text{расч. } j, i} = Q_{\text{пр. } j, i} - \bar{Q}_{\text{отб. } j, i} - \bar{Q}_{\text{вод. } j, i} - \bar{Q}_{\text{пот. } j, i}, \quad (13.1)$$

где  $\bar{Q}_{\text{расч. } j, i}$  – расчетный (зарегулированный) расход воды в  $j$ -м створе;  $Q_{\text{пр. } j, i}$  – приток к  $j$ -му расчетному створу;  $\bar{Q}_{\text{отб. } j, i}$  – отборы воды на участке между  $j$ -м и вышележащими створами,  $\bar{Q}_{\text{вод. } j, i}$  – расход воды в водохранилище, расположенном в  $j$ -м створе;  $\bar{Q}_{\text{пот. } j, i}$  – потери расхода воды из водохранилища, расположенного в  $j$ -м створе.

Мощность ГЭС, расположенной в  $j$ -м расчетном створе в  $i$ -м расчетном интервале, рассчитывается по формуле

$$\bar{N}_{\text{ГЭС } j, i} = 9,81 \cdot \bar{\eta}_{j, i} \cdot Q_{\text{ГЭС } j, i} \cdot H_{\text{ГЭС } j, i} \quad (13.2)$$

где  $\bar{\eta}_{j, i}$  – среднеинтервальное значение к.п.д. гидроагрегатов;  $\bar{H}_{\text{ГЭС } j, i}$  – напор, подведенный к агрегатам ГЭС.

Управление запасами воды в водохранилищах осуществляется в соответствии с диспетчерскими графиками, которые задаются для каждого расчетного створа. Диспетчерские графики определяют отдачу гидроузлов и гидроэлектростанций в зависимости от запасов воды в водохранилище и являются исходными данными для расчетов.

### 13.3. Методика оценки водохозяйственного и водноэнергетического эффекта развития каскада водохранилищ и энергетических объединений

Расчеты компенсирующего регулирования стока проводятся с применением современной вычислительной техники методом последовательного приближения (подбора) на заданную постоянную суммарную гарантированную водо- или энергоотдачу водохозяйственного или энергетического объединения, исходя из полной сработки полезных объемов водохранилищ гидроузлов. Для сокращения числа итераций в первом варианте суммарную гарантированную отдачу следует определять обобщенными методами.

В практике водохозяйственного проектирования используются множество обобщенных методов в аналитической и графической модификациях [8] для оценки организации и проведения компенсирующего регулирования стока в составе каскадов водохранилищ и энергетических объединений. Ниже излагается достаточно простой в использовании обобщенный аналитический метод.

Метод основан на использовании статистических параметров годового стока и известных номограмм для определения многолетнего объема водохранилищ. При этом коэффициенты изменчивости годового стока рек в створах одиночных гидроузлов или каскада гидроузлов  $C_{vr}$  определяются по зависимостям  $C_{vr} = \sigma / \overline{Q}_r$  или  $C_{vr} = \sigma / \overline{W}_r$  или в условиях энергообъединений  $C_{vr} = \sigma / \overline{Э}_r$ . Здесь  $\sigma$  – стандартное отклонение от нормы;  $\overline{Q}_r, \overline{W}_r$  – среднемноголетний годовой расход воды или объем годового стока;  $\overline{Э}_r$  – энергия среднегодового стока на соответствующем суммарном напоре каскада ГЭС или напоре одиночной ГЭС:

$$\overline{Э}_r = K_N * \overline{Q}_r * \Sigma H \cdot 8760 \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где  $K_N$  – коэффициент мощности (8,1 – 8,9);  $\Sigma H$  – суммарный напор; 8760 – среднее число часов в году.

Из математической статистики известно, что дисперсия суммарного ряда  $\sigma_{\Sigma}^2$  равна

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2 + 2\sigma_1\sigma_2r_{1/2} + 2\sigma_1\sigma_3r_{1/3} + 2\sigma_2\sigma_3r_{2/3} + \dots + 2\sigma_{n-1}\sigma_n r_{n-1/n}, \quad (13.3)$$

где  $\sigma_1 = C_{v1} \overline{Э}_1$ ;  $\sigma_n = C_{vn} \overline{Э}_n$ . Здесь  $C_{v1}, C_{v2} \dots C_{vn}$  – коэффициенты изменчивости годового притока в соответствующие водохранилища ГЭС;  $\overline{Э}_1, \overline{Э}_2, \dots, \overline{Э}_n$  – энергия годового притока в водохранилища на соответствующем суммарном напоре ГЭС;  $r_{1/2}, r_{1/3}, r_{n-1/n}$  – коэффициенты корреляции между годовыми притоками в соответствующие водохранилища. Расчеты проводятся последовательно от водохранилищ, обладающих меньшими коэффициентами регулирования, к водохранилищам с более высокими степенями регулирования стока. Приведенная формула использована для оценки эффекта как за счет

асинхронности стока рек, так и за счет компенсирующего регулирования при объединении каскадов ГЭС, расположенных на реках Кольского полуострова, Карелии и Ленинградской области. Результаты расчета показали, что прирост суммарной гарантированной мощности рассматриваемых ГЭС Северо-Западного энергообъединения при проведении компенсирующего регулирования может составить 8,4%.

Расчет компенсирующего регулирования по критическому маловодному периоду с 1936-37 по 1942-43 водохозяйственные годы Ковдинским, Туломским и Нивским каскадами ГЭС суммарной гарантированной отдачи при независимом регулировании остальных каскадов ГЭС дали такие же величины прироста отдачи, что и полученные обобщенным методом. Это указывает на применимость данного метода при решении подобных задач.

Число связей по формуле (13.3) определяется по известной формуле  $S = n(n-1)/2$ , где  $n$  – число водотоков. Например,  $S = 66$  при  $n = 12$ . Это достаточно большой объем проведенных вычислений. Поэтому с целью уменьшения его при определении дисперсий суммарного ряда следует использовать формулу:

$$\sigma_{\sum_1^n}^2 = \left[ \left( \sum_1^{n-1} \bar{\varepsilon} \right) C_{v \sum_1^{n-1}} \right]^2 + \sigma_n^2 + 2 \left( \sum_1^{n-1} \bar{\varepsilon} \right) C_{v \sum_1^{n-1}} \sigma_n r_{\sum_1^{n-1}} \quad (13.4)$$

Стандартное отклонение суммарного ряда равно:

$$\sigma_{\sum_1^n} = \sqrt{\sigma_{\sum_1^n}^2}$$

Здесь  $\sigma_n = C_{v_n} \bar{\varepsilon}_n$ ;  $\bar{\varepsilon}_n$  – энергия годового стока, контролируемого ГЭС;  $C_{v \sum_1^{n-1}}$  – коэффициенты изменчивости сумм годовой энергии стока, контролируемой гидроэлектростанциями, от 1-й до  $(n-1)$ ;  $r_{\sum_1^{n-1}}$  – коэффициент корреляции между суммой энергии годового

стока на ГЭС от 1 до  $(n-1)$  и энергией на  $n$ -й ГЭС.

По вычисленной дисперсии ряда определяем коэффициент изменчивости суммарной энергии годового стока:

$$C_v \sum_1^n = \sigma \sum_1^n / \sum_1^n \bar{\varepsilon}, \quad (13.5)$$

где  $\sigma \sum_1^n$  – стандартное отклонение суммарной энергии стока;  $\sum_1^n \bar{\varepsilon}$

– сумма энергий годовых стоков с различных частей бассейна.

По найденным  $C_v \sum_1^n$  и известному коэффициенту многолетней составляющей объема  $\beta \sum_1^n$  с графиков Гуглия или Плешкова в зави-

симости от  $r_1$  снимается коэффициент регулирования суммарной отдачи всех гидроэлектростанций  $\alpha \sum_1^n$  (при заданной обеспеченно-

сти отдачи). Суммарная гарантированная отдача электрообъединения при компенсирующем регулировании и с учетом асинхронности стока  $\mathcal{E}_{\text{гар},\Sigma}$  будет равна:

$$\mathcal{E}_{\text{гар},\sum_1^n} = \alpha \sum_1^n \sum_1^n \bar{\varepsilon}, \text{ а } N_{\text{гар},\sum_1^n} = \mathcal{E}_{\text{гар},\sum_1^n} / 8760.$$

Расчеты проводятся последовательно от ГЭС с водохранилищами неглубокого регулирования к ГЭС с водохранилищами, обладающими большими  $\alpha$ . Приведенным, более совершенным, методом выполнен расчет эффекта компенсирующего регулирования в нижнем течении Енисея к «Докладу по использованию уникальных гидроэнергетических ресурсов бассейнов рек Енисея и Ангары», разработанному Ленгидропроектом. Результаты расчетов приведены в табл. 13.2.

Анализ данных таблицы показывает, что прирост суммарной гарантированной мощности ГЭС в бассейне Нижнего Енисея за счет асинхронного стока может составить 757 МВт, или 8,1% аналогичной мощности при независимом регулировании. При организации и проведении межбассейнового компенсирующего электрического регулирования прирост мощности ГЭС может возрасти до 1220 МВт, или 13,1%.

Таблица 13.2

**Увеличение суммарной гарантированной отдачи каскада ГЭС  
на р. Енисее и его притоках**

Гидроэлектростанция	Среднего- довой сток, км <sup>3</sup>	C <sub>вр</sub>	Увеличение гарантированной мощности, МВт	
			при независи- мом регулиро- вании стока за счет его асинхронности	при компенси- рующем регули- ровании стока с учетом асин- хронности стока
На Ангаре и Енисее до Осиновской ГЭС включительно	285,7	0,09	0	
Подкаменная	55,5	0,15	140	
Итого	341,2	0,08	140	328
Туруханская	113,2	0,14	392	
Итого	454,4	0,07	532	919
Курейская	20,2	0,20	119	
Итого	474,6	0,07	651	1116
Игарская	54,9	0,12	74	
Итого	529,5	0,07	725	1197
Усть-Хантайская	16,6	0,20	32	
Всего	546,1	0,07	757	1220

Проверка результатов, полученных обобщенным методом, была проведена расчетами регулирования по маловодному периоду с 1974-75 по 1981-82 гг. на постоянную суммарную гарантированную отдачу. При этом результаты оказались практически одинаковыми.

Если требуется определить суммарную гарантированную водоотдачу каскада водохранилищ  $W_{\text{гар.}} \sum_1^n$ , то в предлагаемой расчетной

схеме необходимо вместо энергии годового стока подставить соответствующие значения среднего многолетнего стока –  $\overline{W}_a$ , контролируемого водохранилищами. При этом порядок расчета сохраняется.

Эффект каскадного компенсирующего регулирования стока, выраженный в приращении суммарной гарантированной водоотдачи, был рассчитан в бассейне р. Оранжевой, протекающей по территории небольшой горной страны Лесото, окруженной ЮАР. Для использования водного потенциала реки в пределах ее бассейна сооружены четыре гидроузла с водохранилищами различной степени регулирования стока. Схема расположения гидроузлов дана на рис. 13.2.

Таблица 13.3

Матрица парных коэффициентов корреляции между годовым стоком за совместный 12-летний период наблюдений

Гидроузел	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
№ 1		0,88	0,76	0,65
№ 2	0,88		0,88	0,78
№ 3	0,76	0,88		0,58
№ 4	0,65	0,78	0,58	

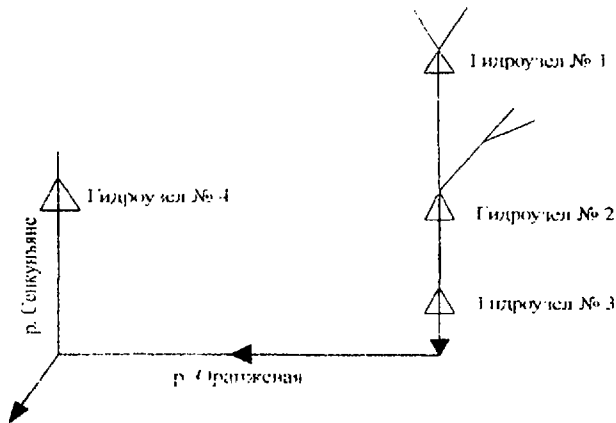


Рис. 13.2. Схема расположения гидроузлов в бассейне р. Оранжевой.

Матрица парных коэффициентов корреляции между годовым стоком в створах гидроузлов дана в табл. 13.3. Анализ данных таблицы позволяет сделать вывод о синхронности стока в бассейне р. Оранжевой.

Расчет эффекта каскадного компенсирующего регулирования стока производится по формуле (13.3) последовательно от водохранилищ меньшей регулирующей способности, т.е.  $\alpha$ , к водохранилищам глубокого регулирования стока, т.е. с большими  $\alpha$ . В формуле (13.3) для решения поставленной задачи:  $\sigma_1 = C_{v1} \bar{W}_{г1}$ ;  $\sigma_n = C_{vn} \bar{W}_{гn}$ , где  $C_{v1}, C_{v2} \dots C_{vn}$  – коэффициенты изменчивости годового стока в створах гидроузлов;  $r_{1/2}, r_{1/3}, r_{n-1/n}$  – коэффициенты корреля-

ции между годовыми притоками в соответствующие водохранилища гидроузлов;  $\bar{W}_{r1}, W_{r2}, \dots, W_{rn}$  – среднееголетние объемы годового стока в створах гидроузлов. По вычисленной  $\sigma_{\sum_1^n}$  определяется

коэффициент изменчивости суммарного годового стока:

$$C_{v\sum_1^n} = \sigma_{\sum_1^n} / \sum_1^n \bar{W}_r,$$

где  $\sum_1^n \bar{W}_r$  – сумма объемов годовых стоков в различных частях бассейна реки.

По  $C_{v\sum_1^n}$  и известному суммарному многолетнему объему водохранилищ, выраженному в долях суммарного годового стока  $\beta_{\sum_1^n}$  с графиков И.В. Гуглия или Я.Ф. Плешкова, в зависимости от

коэффициента автокорреляции  $r_1$  снимается коэффициент регулирования суммарной водоотдачи всех водохранилищ  $\alpha_{\sum_1^n}$  заданной

расчетной обеспеченности, а через него определяется суммарная гарантированная водоотдача каскада в условиях организации и проведения компенсирующего регулирования стока:

$$W_{\text{гар}\sum_1^n} = \alpha_{\sum_1^n} \sum_1^n \bar{W}_r.$$

Расчет проводился в удобной табличной форме – табл. 13.4.

Из таблицы видно, что эффект каскадного компенсирующего регулирования стока выражается в приращении суммарной гарантированной водоотдачи на 69 млн. м<sup>3</sup>, или 3,4%, по отношению к аналогичной при изолированной работе каскада. Приняв во внимание, что данное повышение располагаемых к использованию водных ресурсов падает на остродефицитный по воде маловодный период, можно предположить, что оно вполне оправдано.

Таблица 13.4

Увеличение суммарной гарантированной водоотдачи водохранилищ в бассейне р. Оранжевой при их работе в режиме компенсирующего регулирования стока

Водохранилища гидроузлов	$\bar{W}_{гг}$ , млн. м <sup>3</sup>	$\beta_{\text{ши}}$	При независимом регулировании стока				При компенсирующем регулировании стока			$\Delta W_{\text{гар}}$ , млн. м <sup>3</sup>
			$C_{гг}$	$r_1$	$\alpha$	$W_{\text{гар}} = \alpha W_{гг}$ , млн. м <sup>3</sup>	$C_{гг}$	$\alpha$	$W_{\text{гар}} = \alpha W_{гг}$ , млн. м <sup>3</sup>	
№ 4	368,6	2,9	0,70	0,60	0,66	245				
№ 3	803,2	3,7	0,76	0,60	0,70	560				
Итого	1171,8	3,4				805	0,67	0,73	855	50
№ 2	1124,6	3,4	0,70	0,60	0,72	812				
Итого	2296,4	3,4				1617	0,67	0,73	1676	59
№ 1	491,4	2,4	0,45	0,60	0,82	405				
Итого	2787,8	3,2				2022	0,62	0,75	2091	69

При разработке территориальных и бассейновых схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, схемы водообеспечения районов и промышленных узлов, проектов территориального перераспределения стока и создания Единой водохозяйственной системы требуется выявить дополнительные водные ресурсы за счет учета асинхронности стока двух и более рек, связанных в единую систему. Для решения поставленной задачи можно использовать методику ЦНИИКИВРА, суть которой сводится к сравнению совмещенных («слитых») эмпирических кривых обеспеченности суммарного хронологического и суммарного равнообеспеченного стока рек-доноров и рек-приемников. Разность ординат, снятых по первой и второй кривым для одинаковых обеспеченностей (90 или 95%), есть эффект за счет асинхронности стока при объединении рек с одновременным наступлением на них периодов высокого и низкого стока или с непараллельным ходом стока одноименных сезонов.

Количественный эффект асинхронности рассчитывается по среднемесячным рядам стока.

Суммарный хронологический сток находят путем суммирования матриц среднемесячных значений естественного стока реки-донора и естественного стока реки-приемника за одни и те же годы и одноименные месяцы. Затем производится ранжирование этих суммарных значений в убывающем порядке с одновременным расчетом эмпирической обеспеченности

$$\sum Q_{xp}^{1-12} = Q_{ест}^{p.-д} + Q_{ест}^{p.-п}, \quad (13.6)$$

где  $\sum Q_{xp}^{1-12}$  – суммарный хронологический сток последовательно с 1-го по 12-й месяц;  $Q_{ест}^{p.-д}$  и  $Q_{ест}^{p.-п}$  – соответственно, естественный среднемесячный сток реки-донора с 1-го по 12-й месяц и естественный среднемесячный сток реки-приемника с 1-го по 12-й месяц.

Расчет суммарного равнообеспеченного стока выполняется путем ранжирования среднемесячных значений стока рек-доноров и отдельно стока рек-приемников в убывающем порядке с одновременным расчетом эмпирических значений обеспеченности. Затем равнообеспеченные значения среднемесячного стока (донора и приемника) суммируются:

$$\sum Q_{рб}^{1-12} = (Q_{ест}^{p.-д})_{p\%} + (Q_{ест}^{p.-п})_{p\%}, \quad (13.7)$$

где  $\sum Q_{рб}^{1-12}$  – суммарный равнообеспеченный сток с 1-го по 12-й месяц;  $(Q_{ест}^{p.-д})_{p\%}$  – расчетные значения естественного стока реки-донора той же обеспеченности, что и реки-приемника;  $(Q_{ест}^{p.-п})_{p\%}$  – расчетные значения естественного стока реки-приемника той же обеспеченности, что и реки-донора.

«Слитые» эмпирические кривые обеспеченности суммарного хронологического и суммарного равнообеспеченного стока реки-донора и реки-приемника приведены на рис. 13.3.

По одинаковым значениям обеспеченности и за одноименные месяцы определяют абсолютное значение количественного эффекта:

$$\Delta Q = \sum Q_{xp}^{1-12} - \sum Q_{рб}^{1-12}, \quad (13.8)$$

где  $\Delta Q$  – количественный эффект асинхронности, выражаемый как в расходах воды ( $m^3/c$ ), так и в объемных единицах (млн.  $m^3$  или  $km^3$ ).

Метод вполне применим и для оценки энергетического эффекта за счет только асинхронности стока рек, на которых расположены объединяемые ГЭС. Для этого строят аналогичные «слитые» эмпирические кривые обеспеченности мощностей объединяемых ГЭС.

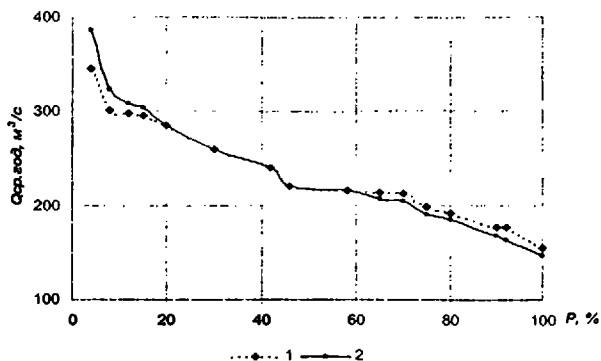


Рис. 13.3. Кривые обеспеченности суммарного хронологического годового стока (1) и суммарного равнообеспеченного годового стока (2) реки-донора и реки-приемника.

Учет асинхронности речного стока в водохозяйственных и водноэнергетических расчетах повышает надежность работы водохозяйственных и энергетических установок и систем или же снижает их параметры, влияя тем самым на их технико-экономические показатели.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Дайте определение каскада гидроузлов и водохранилищ.
2. Чем отличается режим работы каскадно расположенных водохранилищ от изолированных?
3. Назовите схемы работы водохранилищ в каскаде и их сущность.
4. Чем оправдана экономическая и экологическая выгода каскадно расположенных водохранилищ?
5. Как проводится каскадное регулирование стока?
6. Каковы гидрологические и водохозяйственные предпосылки для проведения электрического компенсирующего регулирования стока?
7. Назовите основные положения методики оценки водохозяйственного и энергетического эффекта при организации и проведении каскадного компенсирующего регулирования стока.

## **Глава 14. РАЗРАБОТКА ПРАВИЛ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ ВОДОХРАНИЛИЩ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

### **14.1. Общие положения**

Основным документом, регламентирующим принципы и методы управления речным стоком с максимально возможным учетом интересов водопользователей и безопасности подпорных сооружений гидроузла, населения и хозяйства в его нижнем бьефе, в настоящее время являются Правила использования водных ресурсов водохранилищ гидроузлов, в дальнейшем называемые в тексте Правила.

Порядок эксплуатации водохранилищ в России определяется в соответствии с Водным кодексом Российской Федерации [23] и Правилами использования водных ресурсов, утвержденными соответствующими органами.

Выполнение этих Правил обязательно как при проектировании режима работы водохранилища, так и в условиях его эксплуатации. При этом должен достигаться эффект, близкий к оптимальному.

Правила являются руководящим документом, обязательным для всех организаций и ведомств, имеющих отношение к эксплуатации и использованию водных ресурсов данной системы. Надежность снабжения потребителей водой и энергией в установленных размерах обеспечивается строгим применением Правил.

Отдача из водохранилища назначается в зависимости от времени года и от запаса воды в водохранилище на данную дату согласно упомянутым правилам. Эти правила разрабатываются с учетом ожидаемого (с той или иной степенью вероятности) хода стока на основе данных о его режиме за прошедшие годы.

Правила составляются с таким расчетом, чтобы в любое время года можно было обеспечить:

- безопасность основных сооружений гидроузла и объектов хозяйства, расположенных в его бьефах;
- нормированную надежность гарантированной отдачи водопользователям;
- максимальное использование речного стока путем своевременного перехода на расходы, превышающие гарантированные расходы до расходов полной производительности установки;

– постепенное уменьшение водо- или энергоотдачи по мере сокращения запасов воды в водохранилище для предотвращения глобких перебоев в крайне маловодных условиях.

Основным содержанием Правил являются диспетчерские графики, представляющие собой временные связи между энергоотдачей, заборами воды в верхнем бьефе, попусками воды в нижний бьеф, с одной стороны, и уровнями воды в водохранилище – с другой.

В аналитической записи диспетчерский график представляет собой зависимость вида:

$$a_{i,t} = f(Z_{i,t-1}, Q_{i,t}), \quad (14.1)$$

которая показывает, какую отдачу (мощность ГЭС, расход воды в нижний бьеф и т.д.) нужно назначить при эксплуатации  $i$ -го сооружения в интервале времени  $t$  в зависимости от уровня воды в водохранилище на начало этого интервала и прогноза притока к водохранилищу  $i$ -го сооружения. При построении диспетчерского графика на оси ординат откладываются объемы или соответствующие им уровни водохранилища, на оси абсцисс – время года. Координатное поле диспетчерского графика разделяется характерными линиями, как правило, на три-четыре основные зоны, каждой из которых соответствует определенный режим работы водохранилища:

- зона гарантированной отдачи;
- зона повышенной (по сравнению с гарантированной) отдачи;
- зона принудительной сработки водохранилища;
- зона сниженной (по сравнению с гарантированной) отдачи.

К характерным линиям диспетчерского графика относятся следующие:

1. Противоперебойная линия, представляющая собой верхнюю границу гарантированной отдачи. Отделяет зону гарантированной отдачи от зоны повышенной отдачи. Состоит из двух ветвей: ветви опорожнения (сработки), ограничивающей упомянутую зону в период межени и не допускающей чрезмерной сработки водохранилища; ветви весеннего наполнения, обеспечивающей к концу половодья необходимый запас воды в водохранилище для поддержания отдачи в межень.

2. Линия урезанной, или пониженной, отдачи, представляющая собой нижнюю границу гарантированной отдачи.

Противоперебойная линия своими ветвями охватывает весь сезонный объем водохранилища (полезный объем при сезонном регулировании и сезонную составляющую объема при многолетнем регулировании).

Все характерные линии строятся навстречу ходу времени, т.е. "ходом назад", причем ветви наполнения противоперебойной линии строятся от НПУ до уровня ежегодной сработки водохранилища  $Z_{\text{срб}}$  (до УМО – при сезонном регулировании и до уровня опорожнения сезонной составляющей – при многолетнем регулировании), а ветви сработки тех же линий – от  $Z_{\text{срб}}$  до НПУ.

При разработке диспетчерских графиков год делится на две фазы – половодье и межень. Статистические характеристики для сезонных объемов стока (весна, межень) и расчетные значения этих объемов определяются по фактическим рядам стока в жестких календарных датах. Жесткие даты деления года на сезоны постоянны для всех лет и назначаются с таким расчетом, чтобы фактическое половодье вмещалось в весенний сезон практически при всех сроках начала половодья (ранних и поздних). Одновременно с назначением жестких дат весеннего сезона определяются постоянные границы межени.

На практике границы фаз чаще всего совмещают с началом месяцев и выбирают по данным средних многолетних месячных расходов воды.

Исходные данные, используемые для построения характерных линий диспетчерского графика, приведены в табл. 14.1 и 14.2.

Варианты моделей распределения стока для весны и межени отбираются также из фактических рядов наблюдений за стоком, но не в жестких границах, а по фактической продолжительности каждого отобранного сезона и с приводкой объемов стока этих фактических объемов к расчетному объему стока в жестких датах.

Элементы диспетчерских графиков получаются построением огибающих соответствующих линий сработки и наполнения водохранилища, относящихся к ряду реальных лет (моделей), сток которых предварительно приведен к расчетным значениям.

Расчет и построение элементов диспетчерских графиков начинается с ветви сработки противоперебойной линии, поскольку при таком порядке расчета, помимо основной задачи – построения противоперебойной линии, уточняется сезонный объем, предварительно установленный по формулам.

Таблица 14.1

**Сток фаз, используемый для расчета характерных линий  
диспетчерского графика при сезонном (годовом) регулировании стока**

Линия диспетчерского графика	Сток фазы	Отдача	Порядок расчета
1. Противоперебойная а) ветвь сработки	Межень расчетной обеспеченности $p(M_p)$	Гарантированная	С конца межени "ходом назад" от уровня УМО или сработанного полезного объема
б) ветвь наполнения	Половодье расчетной обеспеченности $p(P_p)$	Гарантированная	С конца половодья "ходом назад" от уровня НПУ или наполненного полезного объема
2. Линия ограничений*	Межень расчетной обеспеченности $p(M_p)$	Гарантированная	С конца межени "ходом назад"

Таблица 14.2

**Сток фаз, используемый для расчета основных линий  
диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока**

Линия диспетчерского графика	Сток фазы	Отдача	Порядок расчета
1. Противоперебойная а) ветвь сработки	Межень года со стоком, равным отдаче (гарантированному расходу воды)	Гарантированная	С конца межени "ходом назад" от уровня ежегодной сработки или сработанной сезонной составляющей полезного объема
б) ветвь наполнения	Половодье года со стоком, равным отдаче (гарантированному расходу воды)	Гарантированная	С конца половодья "ходом назад" от уровня НПУ или наполненного полезного объема
2. Линия ограничений*	Межень года со стоком, равным отдаче	Гарантированная	С конца межени "ходом назад" от уровня УМО или сработанного полезного объема

Построенные указанным путем отдельные элементы сводятся в единый диспетчерский график, на основе которого осуществляются расчеты регулирования и эксплуатации водохранилища. В процессе регулирования речного стока по длительному наблюдаемому или смоделированному ряду возможны некоторые уточнения зон диспетчерского графика с учетом реального распределения стока как внутри года, так и по годам.

Теория и практические приемы разработки диспетчерских графиков, специфических для каждого водохранилища, подробно изложены в [7, 8, 39].

Следует отметить, что в настоящее время достаточно подробно разработаны способы построения диспетчерских графиков управления режимами работы первоочередных (одиночных) водохранилищ.

Разработка и построение диспетчерских графиков управления работой каскадами водохранилищ и ГЭС, гидравлически связанных и не связанных гидравлически, производится на базе расчетов оптимизации их длительных режимов. При этом схема управления режимом совместной работы некоторой группы гидроузлов системы может быть представлена следующим образом:

- компенсируемые гидроузлы управляются независимо по собственным правилам управления вида, представленного на рис. 14.1;
- гидроузлы-компенсаторы высшего уровня иерархии управления дополняют отдачу остальных гидроузлов до общей (совокупной) гарантированной отдачи гидроузлов. При этом их собственная отдача изменяется от минимально до максимально допустимого значения.

Водохранилища ГЭС-компенсаторы управляются диспетчерскими графиками в зависимости от достигнутого их наполнения и суммарной отдачи компенсируемых ГЭС. В аналитической записи такой диспетчерский график можно представить зависимостью вида

$$a_{i,t} = f\left(Z_{i,t} \sum_{k=1}^l a_{k,t}\right), \quad (14.2)$$

где  $a_{i,t}$  – отдача  $i$ -й ГЭС-компенсатора или  $i$ -го водохранилища-компенсатора в интервале времени  $t$ ,  $a_{k,t}$  – отдача  $k$ -й компенсируемой установки в интервале времени  $t$ ,  $Z_{i,t}$  – уровень водохранилища ГЭС-компенсатора на начало интервала времени  $t$ .

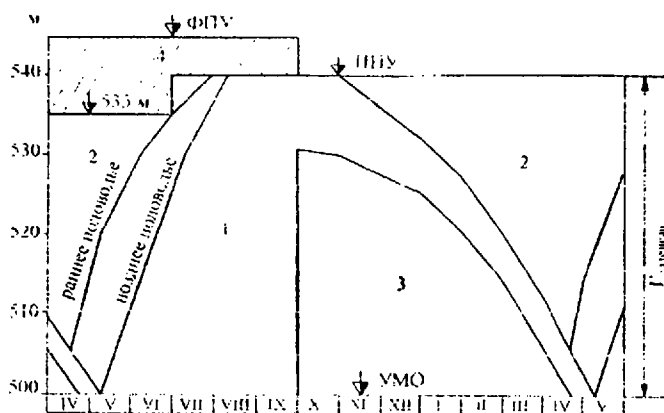


Рис. 14.1. Диспетчерский график управления работой водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС.

- 1 – зона гарантированной отдачи ( $Q=Q_{\text{гпр}}$  в летний период и  $N=N_{\text{гпр}}$  в зимний период)  
 2 – зона повышенной отдачи; 3 – зона урезанной отдачи; 4 – зона работы водосброса и ГЭС.

Приток в водохранилища глубокого регулирования стока играет второстепенную роль, так как в многолетнем разрезе достаточно устойчив.

Весьма сложной является задача оптимизации режимов работы каскадов водохранилищ и ГЭС комплексного использования стока. Здесь возникают сложности с учетом требований неэнергетических участников энергосводохозяйственных комплексов (водный транспорт, рыбное и сельское хозяйство). Учет их требований в настоящее время производится с помощью так называемой системы ограниченный режимов работы ГЭС с учетом природоохранных требований. Ниже кратко излагаются основные интересы водопользователей и исходные данные, необходимые для разработки Правил так, как они приведены в Методических указаниях по составлению Правил [39].

#### 14.2. Интересы водопользователей и их учет в Правилах управления водными ресурсами водохранилищ

При многоцелевом использовании водохранилищ удовлетворение в полном объеме требований всех компонентов и отраслей хозяйства во все годы практически невозможно. Поэтому режимы использования водных ресурсов представляют собой, как правило,

компромиссные решения, при которых неизбежны ущемления в тех или иных размерах интересов всех или части компонентов энерговодохозяйственного комплекса (ЭВХК) для достижения максимального эффекта в целом. В Правилах следует приводить только ту часть отраслевых или экологических требований, которая может быть удовлетворена с той или иной степенью надежности (обеспеченности). Ниже рассматриваются требования к режиму использования водных ресурсов водохранилищ со стороны основных отраслей хозяйства.

Гидроэнергетика:

- обеспечение гарантированной мощности ГЭС;
- снижение ее за пределами нормируемой обеспеченности не должно превышать 20 – 30%;
- годовая выработка электроэнергии ГЭС должна быть максимальной возможной в любых по водности условиях.

Водный транспорт и лесосплав:

- в период навигации – обеспечение нормируемых глубин по всей трассе судового хода, как в водохранилищах, так и на незарегулированных участках рек, путем поддержания соответствующих расходов воды и обеспечение расходов (объемов) воды для шлюзования через гидроузлы;
- в межнавигационный период – поддержание заданных уровней воды в местах зимнего отстоя судов.

Эффективное функционирование водного транспорта зависит от глубины навигационной сработки водохранилища, размеров специальных навигационных попусков в различное время года (например, в целях разрушения льда весной), объемов весеннего половодья, которые влияют на заносимость землечерпательных прорезей, внутрисуточных и внутринедельных колебаний уровней воды в нижних бьефах гидроузлов и др.

Компенсация, полная или частичная, уменьшения водных ресурсов, выделяемых водному транспорту, технически возможна за счет дополнительного объема дноуглубительных работ на транзите и в портовых акваториях, изменения осадки используемых судов (создание нового флота либо аренда в других пароходствах), а также за счет использования других видов транспорта (железнодорожного, автомобильного).

В процессе эксплуатации на многих гидроузлах водный транспорт увеличил заявки на воду, т.е. потребовал увеличения навигационных попусков. Увеличение попусков, эффективное с отраслевой точки зрения, приводит к уменьшению водообеспечения других отраслей (например, на Ангаро-Енисейском каскаде – энергетики; на Волжско-Камском каскаде – рыбного хозяйства, водоснабжения, энергетики). В табл. 14.3 приведены величины снижения гарантированной отдачи по отношению к проекту за счет увеличения навигационных попусков из водохранилищ ряда сибирских ГЭС.

Обеспеченность попусков в зарегулированных условиях принята равной 95% (по продолжительности навигации).

С целью ликвидации подобных ущербов на ЭВХК следует одновременно с обоснованием величины навигационного попуска определять и объем воднотранспортных попусков или объем навигационной сработки водохранилища. Это в условиях деформируемых русел ниже створов гидроузлов и возможного увеличения транспортных потоков сохранит разработанную в проекте систему распределения водных ресурсов между водопользователями.

Таблица 14.3

**Режим навигационных попусков из водохранилищ сибирских ГЭС**

( $Q_n$  – величина навигационного попуска, м<sup>3</sup>/с;  $p$  – обеспеченность ее в естественных условиях, %;  $\Delta N$  – снижение гарантированной отдачи по отношению к проекту, %)

Гидроузел	Вариант	$Q_n$	$p$	$\Delta N$
Новосибирский	проект	750	95	
	н/время	1300	79	20
Саяно-Шушенский	проект	1100	89	
	н/время	1800 (V-VI) 1200 (VIII-X)	86	20
Красноярский	проект	2100	91	
	н/время	2550	84	11,3
	прогноз	2750	82	18,1

**Рыбное хозяйство:**

– обеспечение естественного воспроизводства рыб, т.е. системы условий, обеспечивающих естественный нерест и миграции в реке промысловых рыб;

– обеспечение зимовки рыб в зоне водохранилища.

**Водоснабжение:**

– обеспечение регламентированных расходов воды для безребойной работы водозаборных сооружений, а также в поддержании высокого санитарного качества воды.

При принятой величине попусков, обеспечивающих требования отраслей хозяйства, утверждаются параметры ГЭС и, в частности, гарантированная водо- и энергоотдача ГЭС в зимний период.

#### **14.3. Исходные данные для разработки Правил управления водными ресурсами водохранилищ**

Исходная информация, необходимая как для составления или пересмотра Правил, так и для выполнения проектных водохозяйственных и водноэнергетических расчетов, практически совпадает. Она подразделяется на следующие группы:

- гидрологическая информация – календарная последовательность средних за принятые расчетные интервалы времени (месяц, декада, сутки) естественных или зарегулированных вышележащих водохранилищами расходов воды в створах гидроузлов и боковой приточности на участке между гидроузлами за весь или часть периода наблюдений, а также расчетные гидрографы высокого паводочного и паводочного стока расчетной вероятности превышения. По мере накопления данных наблюдений за стоком, например через 10–12 лет, следует уточнять статистические параметры годового, сезонного и максимального стока. Используемая календарная последовательность стока должна быть однородной. При недостаточной длительности наблюдаемого гидрологического ряда целесообразно применять искусственные (смоделированные) гидрологические ряды;

- гидролого-гидравлическая информация в виде кривых связей расходов и уровней воды  $Q = f(Z)$  в нижнем и верхнем бьефах гидроузла;

- морфометрическая информация в виде кривых статических площадей зеркала и объемов водохранилища от уровней воды  $F = f(Z)$  и  $V = f(Z)$  или динамических объемов воды  $V = f(Q, Z)$ ;

- информация о потерях или затратах стока (на дополнительное испарение, на ледообразование, водоснабжение, орошение, шлюзование, фильтрацию);

- основные характеристики плана водохозяйственного использования (гарантированная водо- и энергоотдача и распределение ее на протяжении года; расход полной производительности гидроузла, величина полезного объема водохранилища и масштабы регулирования стока, состав и пропускная способность водосбросных сооружений, эксплуатационные характеристики гидроагрегатов и потерь напора).

#### 14.4. Разработка диспетчерских графиков управления работой некоторых водохранилищ сибирских гидроэлектростанций

а) Водоохранилища Саяно-Шушенской ГЭС на р. Енисее (в составе проектного задания).

Водоохранилище Саяно-Шушенской ГЭС полезным объемом  $15,8 \text{ км}^3$ , осуществляет годичное регулирование стока. Водные ресурсы его используются многопланово – водоснабжение, судоходство, снижение угрозы наводнений, выработка электроэнергии. Требования судоходства обеспечиваются навигационными попусками из водохранилища в период с мая по октябрь включительно, величина которых была принята в Проектном задании на уровне естественных расходов, равных  $1100 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Ниже излагается один из практических приемов расчета, построений и компоновки диспетчерского графика управления работой водохранилища ГЭС годичного регулирования стока.

Основные гидрологические характеристики р. Енисей в створе гидроузла за период наблюдений:

средний расход воды . . . . .  $\bar{Q}_r = 1480 \text{ м}^3/\text{с}$

среднегодовой сток . . . . .  $\bar{W}_r = 46,7 \text{ км}^3$

коэффициент изменчивости годового стока . . . . .  $C_{v,r} = 0,15$

средний сток межени (X–IV) . . . . .  $\bar{W}_m = 8,65 \text{ км}^3$

коэффициент изменчивости стока межени . . . . .  $C_{v,m} = 0,17$

средний сток половодья (IV–3, V, VI) . . . . .  $\bar{W}_n = 26,4 \text{ км}^3$

коэффициент изменчивости стока фазы половодья  $C_{v,n} = 0,15$ .

Параметры водохранилища и ГЭС на момент разработки графика приняты следующие:

нормальный подпорный уровень (НПУ) . . . . . 540 м

уровень мертвого объема (УМО) . . . . . 500 м

полезный (регулирующий) объем . . . . .  $15,8 \text{ км}^3$

коэффициент регулирования . . . . .  $\alpha = 0,77$

расчетная обеспеченность отдачи . . . . .  $p = 95\%$

гарантированный расход обеспеченностью 95%  $Q_{\text{гар}} = 1140 \text{ м}^3/\text{с}$

полная пропускная способность ГЭС . . . . .  $Q_b = 2500 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Потери воды из водохранилища на дополнительное испарение, фильтрацию в нижний бьеф и ледообразование в данном примере

Таблица 14.5

Год	Месяц-декада	Расход, м <sup>3</sup> /с				Объем, км <sup>3</sup>			Уровень волохра-нища на конец месяца (декады), м
		средний на-блюденный	приведенный	дефицита до $Q_{гпр} = 1140$ м <sup>3</sup> /с	дефицита	наполнения на конец месяца (декады)			
1910	IX	847	906	234	0,62	31,26	539,9		
	X	571	610	530	1,39	30,64	538,9		
	XI	299	320	820	2,16	29,25	536,5		
	XII	288	308	832	2,19	27,09	532,5		
1911	I	260	278	862	2,27	22,63	522,5		
	II	230	246	894	2,35	20,28	515,4		
	III	206	220	920	2,42	17,86	507,2		
	IV-1	140	150	990	0,85	17,01	503,9		
	IV-2	308	330	810	0,70	16,31	501,2		
IV-3	734	786	354	0,31	16,00	500,0			

Каждой межени-модели соответствует своя линия сработки во-дохранилища. Верхняя огнибающая всех рассчитанных и построен-

в целях его упрощения не учитывались. Однако в процессе проектирования они подлежат обязательному учету. Для этого в нижеприведенных расчетных таблицах вводятся дополнительные графы. Расчеты выполнялись в следующем порядке.

1. Противоперебойная линия – ветвь сработки. Для расчета ветви сработки противоперебойной линии отобраны годы со стоком межени, близким к  $W_{\text{пр}} = 6,36 \text{ км}^3$  ( $W_{\text{пр}}$  – сток межени расчетной обеспеченностью 95%), включенные в табл. 14.4.

Сток перечисленных межени приведен к  $W_{\text{пр}}$  путем умножения на соответствующие коэффициенты приведения.

Расчет ветвей сработки противоперебойной линии ведется "холом назад" от отметки, соответствующей УМО 500 м с момента, когда расходы на подъеме половодья равны  $Q_{\text{гпр}} = 1140 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Таблица 14.4

Годы со стоком межени, близким к $W_{\text{пр}} = 6,36 \text{ км}^3$					
Год	1910–11	1912–13	1929–30	1933–34	1953–54
Объем стока межени, $\text{км}^3$	5,93	8,68	9,85	7,25	6,31
Коэффициент приведения к $W_{\text{пр}}$	1,07	0,73	0,65	0,88	1,01

ных линий принимается за ветвь сработки противоперебойной линии диспетчерского графика. При этом нижняя огибающая принимается за линию урезанной отдачи.

2. Противоперебойная линия – ветвь наполнения. Для расчета ветви наполнения противоперебойной линии из исходного гидрологического ряда отобрано 5 лет с объемом стока половодья, близким к расчетному обеспеченностью 95%. По всем годам приведены расчеты "ходом назад", т.е. от заполненного до НПУ водохранилища. Порядок расчета можно проследить по табл. 14.6, в которой приведен пример, относящийся к половодью 1909 г.

Таблица 14.6

Расчеты ветви наполнения противоперебойной линии

Год	Месяц-декада	Расход, м <sup>3</sup> /с		Объем, км <sup>3</sup>		Уровень водохранилища на конец месяца (декады), м
		приведенный	превышение над $Q_{\text{гар}} = 1140 \text{ м}^3/\text{с}$	аккумуляции	наполнения на конец месяца (декады)	
1909					16,24	501,0
	V <sub>1</sub>	2310	1170	1,02	17,26	504,9
	V <sub>2</sub>	1630	490	0,42	17,68	506,5
	V <sub>3</sub>	4220	3080	2,66	20,34	515,5
	VI <sub>1</sub>	4570	3430	2,96	23,30	524,4
	VI <sub>2</sub>	3520	2380	2,06	25,36	529,1
	VI <sub>3</sub>	3780	2640	2,28	27,64	533,5
	VII	2490	1350	3,55	31,19	539,8
VIII	1320	180	0,15	31,34	540,0	

Наполнение водохранилища начинается с объема 31,34 км<sup>3</sup>, т.е. с объема при НПУ 540 м. Каждому половодью отвечает своя линия наполнения и в совокупности этими линиями обрисовывается довольно широкая полоса. Верхняя огибающая всех построенных линий и принимается за ветвь наполнения противоперебойной линии при раннем начале половодья, а нижняя – при позднем половодье.

Все линии, построение которых изложено выше, совмещены на графике рис. 14.1. В результате получен диспетчерский график управления работой водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС. На диспетчерском графике в период с мая по октябрь выделена зона с расходами, обеспечивающими условия навигации в нижнем бьефе гидроузла.

#### б) Водохранилища проектируемой Мокской ГЭС на р. Витим.

Проектируемое на р. Витим водохранилище Мокской ГЭС полезным объемом 11,7 км<sup>3</sup> осуществляет многолетнее регулирование

стока. Водные ресурсы водохранилища используются в основном в энергетических целях.

Основные гидрологические характеристики р. Витим в створе гидроузла за период наблюдений:

$$\text{средний расход воды } \overline{Q}_r = 739 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$\text{среднегодовой сток } \overline{W}_r = 23,3 \text{ км}^3,$$

$$\text{коэффициент изменчивости годового стока } C_{vr} = 0,27.$$

Параметры водохранилища и ГЭС на момент разработки графика приняты следующие:

нормальный подпорный уровень (НПУ) 600 м,

уровень мертвого объема (УМО) 575 м,

уровень ежегодной сработки, соответствующий сезонной составляющей полезного объема 582 м,

полезный объем водохранилища  $V_{плз} = 11,7 \text{ км}^3$ ,

в том числе сезонная составляющая  $V_{с.с.} = 8,6 \text{ км}^3$ ,

коэффициент регулирования стока  $\alpha = 0,72$ ,

установленная мощность  $N_{уст} = 1400 \text{ МВт}$ ,

гарантированная мощность обеспеченностью 95%  $N_{гар} = 395 \text{ МВт}$ ,

пропускная способность ГЭС  $Q_b = 1750 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Потери на фильтрацию из водохранилища приняты равными  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ , а на дополнительное испарение –  $6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Потери напора составили 0,5 м.

Расчеты выполнялись в следующем порядке:

Противоперебойная линия. Для расчета противоперебойной линии отобраны годы со среднегодовыми расходами, близкими к отдаче  $\alpha \overline{Q}_r = 0,72 \cdot 793 = 532 \text{ м}^3/\text{с}$ , они представлены в табл. 14.7.

Таблица 14.7

Годы со стоком, близким к отдаче  $\alpha \overline{Q}_r = 532 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Год	1944-45	1954-55	1958-59	1965-66	1979-80
Среднегодовой расход, $\text{м}^3/\text{с}$	578	507	570	517	575
Коэффициент приводки к $Q = 532 \text{ м}^3/\text{с}$	0,92	1,05	0,93	1,03	0,93

1. Противоперебойная линия диспетчерского графика.

Противоперебойная линия диспетчерского графика водохранилища многолетнего регулирования стока определяется для года в целом, без разделения его на фазы половодья и межени. Расчет ведется «ходом назад» от уровня ежегодной сработки 582 м, исходя

из сохранения постоянной гарантированной мощности 395 МВт. При неизвестном наполнении водохранилища  $V_k$  на конец месяца, а следовательно, и напора на ГЭС Н, расход ГЭС определяется методом последовательного приближения в следующем порядке:

- задаемся расходом ГЭС  $Q_{ГЭС \text{ зал.}}$ ;
- определяем расход аккумуляции  $Q_{\text{акк.}} = Q_{\text{ест}} - Q_{ГЭС}$  ( $Q_{\text{ест}}$  – естественный расход воды притока в водохранилище) ;
- вычисляем объем аккумуляции:  $V_{\text{акк.}} = Q_{\text{акк.}} \Delta t$ ;
- находим наполнение водохранилища на конец месяца:  $V_k = V_n + V_{\text{акк.}}$ , по нему с кривой  $V = f(Z)$  снимаем уровень водохранилища  $Z_k$  ;
- вычисляем средний уровень водохранилища  $Z_{\text{ср}} = (Z_k + Z_n) / 2$ ;
- определяем по кривой  $Q = f(Z_{\text{н. б}})$  уровень нижнего бьефа  $Z_{\text{н. б}}$ , соответствующий заданному  $Q_{ГЭС} = 0,7 Q_{\text{пр. спос.}} = 0,7 \cdot 1750 = 1225 \text{ м}^3/\text{с}$  (с учетом суточного регулирования мощности ГЭС);
- вычисляем напор  $H_{\text{нетто}} = Z_{\text{ср}} - Z_{\text{н. б}} - h_{\text{потерь}}$  ;
- находим  $Q_{ГЭС \text{ расч.}} = N_{\text{гар}} / 8,5 \cdot H_{\text{нетто}}$ ;
- $Q_{ГЭС \text{ расч.}}$  должно быть равно  $Q_{ГЭС \text{ зал.}}$ . В случае их неравенства задаемся новым значением  $Q_{ГЭС}$  и расчет повторяется до полного их равенства.

Пример расчета ординат противоперебойной линии по модели 1944-45 г. приведен в табл. 14.8.

Аналогичным способом рассчитаны ординаты противоперебойной линии по другим модельным годам. Затем для каждого года строится совмещенный график наполнений (на конец месяца или декады) водохранилища. Каждому принятому году соответствует своя линия наполнения водохранилища. Верхняя огибающая всех построенных линий и принимается за противоперебойную линию диспетчерского графика. Ординаты ее располагаются в зоне сезонной составляющей полезного объема водохранилища в пределах уровней водохранилища от НПУ = 600 м до уровня ежегодной сработки равного 582 м.

## 2. Линия урезанной отдачи.

Линия урезанной отдачи является границей между зонами гарантированной и урезанной отдачи. Расчет ее проводится по году со стоком равным отдаче также «ходом назад» от уровня мертвого объема УМО = 575 м в остродефицитный по воде период осенне-зимней межени. Ординаты ее располагаются в зоне многолетней составляющей полезного объема водохранилища.

Таблица 14.8

## Расчет противоперебойной линии

Год, месяц, декада	Расход, м <sup>3</sup> /с			Объем, км <sup>3</sup>		Уровень водо- хранилища, м		Уровень нижнего бьефа, м		Напор, м		Мощность ГЭС МВт
	естественный брутто	естественный нетто	ГЭС	аккумуля- ции	наполнения (на конец)	на конец интервала	на средину	брутто	нетто			
1944-45												
V-3	679	668	668	0	11,6	582	582	504	78	77,5	440	
VI	1674	1663	590	1073	11,3	582	584	504	80	78,5	401	
VII	1463	1452	550	902	13,28	586	588,5	504	84,5	84	395	
VIII	1638	1627	520	1107	15,65	591	594,5	504	90,5	92	395	
IX	1214	1203	500	703	18,56	598	599	504	95	94,5	401	
X	506	495	495	0	20,41	600	600	504	96	95,5	401	
XI	41,8	36,8	490	-453	19,22	598	599	504	95	94,5	395	
XII	12,1	7,1	500	-493	17,92	596	597	504	93	92,5	395	
I	4,25	-0,75	520	-521	16,55	593	594,5	504	90,5	90	395	
II	1,42	-3,58	530	-534	15,15	590	591,5	504	87,5	87	395	
III	0,71	-4,29	550	-558	13,69	587	588,5	504	84,5	84	395	
IV	7,10	2,1	570	-578	12,17	583,5	585	504	81	80,5	395	
V-1	66,8	62	590	-528	11,71	582,5	583	504	79	78,5	395	
V-2	481	476	600	-124	11,6	582	582	504	78	77,5	395	

Пример расчета линии урезанной отдачи приведен в табл. 14.9.

При совмещении противоперебойной линии и линии урезанной отдачи на одном графике получается диспетчерский график управления работой водохранилища многолетнего регулирования Мокской ГЭС, приведенный на рис. 14.2.

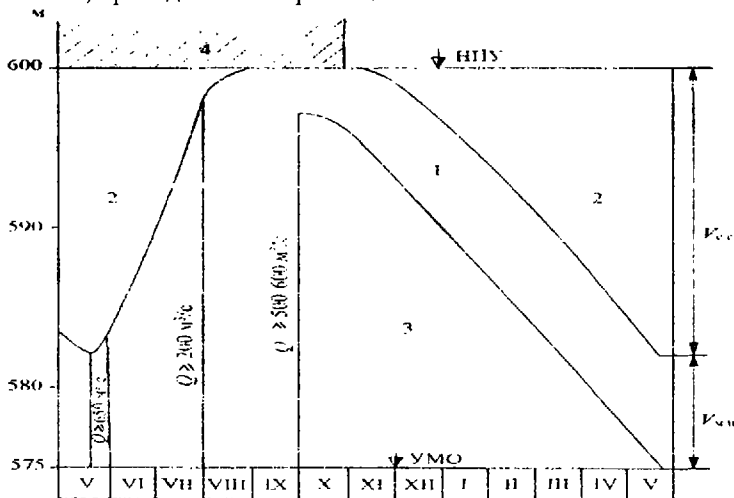


Рис. 14.2. Диспетчерский график управления работой водохранилища проектируемой Мокской ГЭС.

1 – зона гарантированной водо- и энергоотдачи; 2 – зона повышенной отдачи; 3 – зона ограничений; 4 – зона работы водосброса и ГЭС (зона принудительной сработки водохранилища).

### в) Водоохранилище неглубокого сезонного регулирования стока Новосибирской ГЭС.

Диспетчерский график управления работой водохранилища Новосибирской ГЭС на р. Оби приведен на рис. 14.3. Для Новосибирского водохранилища в интересах всех водопользователей, включая и санитарное состояние водотока, впервые был рассчитан и выделен навигационный объем и уровень его сработки. Сработка навигационного объема водохранилища (зона 2 на рис. 14.3) начинается с момента уменьшения в период летне-осенней межени (VIII – X) ежедневных расходов притока ниже навигационного попуска  $1300 \text{ м}^3/\text{с}$  и заканчивается по исчерпанию объема  $1,28 \text{ км}^3$ , т.е. при достижении отметки верхнего бьефа  $112,47 \text{ м}$ . Для обоснования ве-

личины объема навигационной сработки водохранилища была рассчитана и построена кривая зависимости объемов навигационных сработок водохранилища от обеспеченности (продолжительности) регулируемого расхода воды  $1300 \text{ м}^3/\text{с}$ . Кривая построена по данным среднесуточных расходов воды в створе ГЭС за имеющийся длительный период наблюдений  $N$ , где  $N$  – число лет ряда. Продолжительность навигации  $t$  в днях. Задаемся величиной навигационного попуска –  $Q_{\text{нав.}} = 1300 \text{ м}^3/\text{с}$  и объемом навигационных сработок вариантно  $V_1, V_2, V_3$  и т.д. Определяем суммарный расход сработки  $\Sigma Q_1 = V_1 / 86\,400$  и т.д.

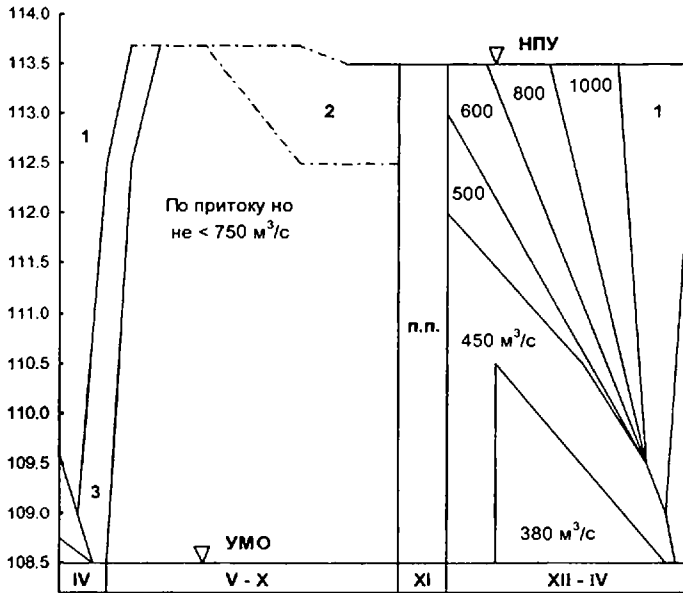


Рис. 14. 3. Диспетчерский график управления работой водохранилища Новосибирской ГЭС.

1 – зона полной пропускной способности ГЭС; 2 – зона, в которой расходы воды изменяются от  $1300$  до  $1100 \text{ м}^3/\text{с}$  в зависимости от прогноза притока и наполнения водохранилища; 3 – зона, в которой расходы воды равны  $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ ; п.п. – переходный период.

Таблица 14.9

## Расчет линии урезанной отдачи

Год, месяц, декада	Расходы, м <sup>3</sup> /с			Объемы, км <sup>3</sup>		Уровень водо- хранилища, м		Уровень нижнего бьефа, м	Напор, м		Мощность ГЭС, МВт
	естественный брутто	естественный нетто	ГЭС	аккумуляции	наполнения (на конец)	на конец интервала	на середину		брутто	нетто	
<b>1979-80</b>											
IX	2418	2407	530	1877	4,94	13,62	587	504	88	87,5	395
X	288	277	505	-228	-0,60	18,56	597	504	92,5	92	395
XI	33,4	27,4	515	-488	-1,28	17,96	596	504	90,5	90	395
XII	12,3	7,3	535	-528	-1,39	16,68	593	504	87,5	87	395
I	3,77	-1,23	535	-556	-1,46	15,29	590	504	84,5	84	395
II	1,53	-3,47	575	-578	-1,52	13,83	587	504	81,5	81	395
III	1,17	-3,83	600	-604	-1,59	12,31	584	504	78	77,5	395
IV	3,68	-1,32	585	-586	-1,54	10,72	580	504	80	79,5	395
V1	51,8	48,8	605	-558	-0,48	11,64	582	504	77,5	77	395
V2	271	266	605	-339	-0,29	11,16	581	504	77	76,5	395

По ряду среднесуточных расходов воды определяем число дней, в течение которых не обеспечивается в естественных условиях заданная величина навигационного попуска  $Q_{нав.} - \Sigma t_{пер.}$ . Затем  $\Sigma t_{пер.}$  определяется при вариантно рассчитанных  $\Sigma Q_2$  и т.д. Определяем продолжительность заданного навигационного попуска  $Q_{нав.}$  в естественных условиях при  $V_1, V_2$  и т.д. по формуле  $P_1 = (t \cdot N - \Sigma t_{пер.}) / t \cdot N$  (в %). По данным  $V_1, V_2$  и  $V_3$  и соответствующих им  $P_1, P_2$  и  $P_3$  при заданном  $Q_{нав.}$  строим кривую, вид которой дан на рис. 14.4. Аналогичные кривые могут быть рассчитаны и при других значениях навигационных попусков. Расчетное значение объема навигационной сработки для попуска в  $1300 \text{ м}^3/\text{с}$  снимается с графика при нормируемой обеспеченности (продолжительности) для данной отрасли хозяйства.

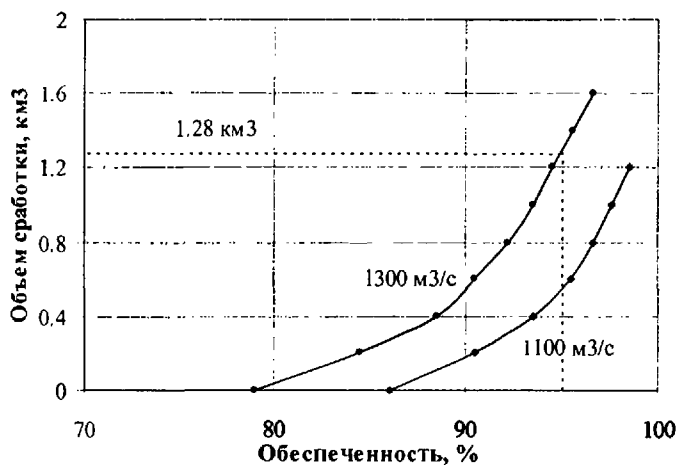


Рис. 14.4. Кривые зависимости навигационных сработок водохранилища Новосибирской ГЭС от обеспеченности (по продолжительности) регулируемых расходов воды.

Построение противоперебойной линии произведено способом, аналогичным годовичному регулированию. Разница только в том, что ветвь сработки противоперебойной линии охватывает не весь полезный объем ( $4,4 \text{ км}^3$ ), а только его часть, остающуюся на начало зимней сработки.

#### 14.5. Основные приемы управления работой каскадов водохранилищ ГЭС

В настоящее время достаточно подробно разработаны способы построения диспетчерских графиков управления режимами работы первоочередных одиночных водохранилищ.

В связи с непрерывным укрупнением энергетических и водохозяйственных систем путем присоединения действующих и вводимых в эксплуатацию водохранилищ ГЭС, обладающих широкими возможностями регулирования речного стока, появилась необходимость в разработке способов управления режимами работы водохранилищ ГЭС в энергетических и водохозяйственных системах.

Разработкой диспетчерских графиков для водохранилищ ГЭС в составе энергообъединения занимались А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева, В.А. Бахтиаров, А.Ш. Резниковский, М.И. Рубинштейн, П.В. Стельмах, Е.В. Цветков и др.

Решение вопроса об оптимальном режиме гидроэлектростанций в системе осложняется отсутствием прогнозов стока на достаточно длительный период. Поэтому основная цель разработок сводится к нахождению правил управления долгосрочными режимами работы водохранилищ каскада гидроузлов в энергетических системах, позволяющих свести к минимуму неизбежные потери из-за невозможности однозначности прогноза стока на несколько лет вперед.

Способы оптимизации режимов работы каскадов гидроэлектростанций в зависимости от формы задания исходной информации подразделяются на *детерминированные* и *вероятностные*.

В настоящее время при оптимизации режимов работы каскадов ГЭС применяются, как правило, детерминированные методы расчетов, которые отличаются простотой и подтверждают свое право на существование многолетней практикой проектирования и эксплуатации каскадов ГЭС. Так, например, в детерминированной постановке разработаны программы длительных режимов водохранилищ и гидроэлектростанций Ангаро-Енисейского, Волжско-Камского и других каскадов (программы МЭИ, Гидропроекта, Энергосетьпроекта и др.). Указанные программы используются и в практике проектирования при сравнении вариантов проектных решений. Основным недостатком методов в детерминированной постановке является однозначность будущего изменения гидрологических данных,

а так как однозначно их предсказать нельзя, то многие авторы предлагают использовать для расчетов оптимизации режимов ГЭС вероятностные методы. Данные методы позволяют строго учитывать вероятностный и частично неопределенный характер исходной информации о речном стоке. Однако применение этого метода осложняется тем, что в настоящее время не решен вопрос о получении всех исходных вероятностных характеристик как по стоку, так и по нагрузке, водо- и энергоотдаче и т.д.

Весьма сложной задачей является задача оптимизации режимов работы каскадов водохранилищ ГЭС комплексного использования стока. Здесь возникают сложности с учетом требований неэнергетических участников водохозяйственного комплекса (водный транспорт, рыбное и сельское хозяйство, водоснабжение и т.д.). Учет их требований с помощью так называемой системы ограничений (по расходам и уровням нижнего бьефа, уровням верхнего бьефа, амплитуде колебаний уровней и т.д.) приводит к возрастанию числа вариантов расчетов при разных ограничениях. Кроме того, возникают трудности оценки некоторых ограничений (рыбное и сельское хозяйство, экология нижнего бьефа).

Поэтому создание алгоритмов и программ по оптимизации режимов работы каскадов водохранилищ и ГЭС в энергетических и водохозяйственных системах, сглаживающих отмеченные недостатки, является вполне актуальным.

Разработка и построение диспетчерских графиков управления работой каскадов водохранилищ и ГЭС на базе расчетов оптимизации их длительных режимов – дело техники. При этом разработка графиков проводится только для гидроэлектростанций с емкими водохранилищами глубокого многолетнего регулирования и большой установленной мощностью. Они являются компенсаторами отдачи остальных ГЭС энергосистемы, обладающих наименьшими возможностями регулирования стока и управляемых независимо, по собственным диспетчерским графикам.

По результатам оптимизационных расчетов регулирования стока по длительному ряду можно подсчитать максимальные дефициты объемов водохранилищ-компенсаторов (максимальных дефицитов стока). Для этого достаточно просуммировать дефициты за критический маловодный период (период сработки полезного объема водохранилища). Выбранные по месяцам максимальные дефициты

объемов водохранилища-компенсатора и определяют собой противоперебойную линию диспетчерского графика, т.е. те наполнения водохранилища на начало каждого месяца, которые необходимы по условиям обеспечения гарантированной отдачи.

***Вопросы для самопроверки***

1. Для решения каких задач разрабатываются правила управления водными ресурсами водохранилищ?
2. Что является основным содержанием Правил?
3. Каковы исходные данные для разработки диспетчерских графиков?
4. Порядок расчета и построения элементов диспетчерских графиков. В чем смысл этого порядка?
5. Каковы особенности разработки диспетчерских графиков в управлении работой водохранилищ многолетнего регулирования стока?
6. Каковы в общих чертах принципы разработки способов управления режимами работы водохранилищ ГЭС в водохозяйственных и энергетических системах?

## **Глава 15. РАСЧЕТ ПРОПУСКА ПОЛОВОДИЙ И ПАВОДКОВ ЧЕРЕЗ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

### **15.1. Задачи и средства регулирования стока половодий и паводков**

Необходимость рассмотрения противопаводковой роли водохранилищ РФ и расчетов пропуска половодий и паводков в составе Правил управления водными ресурсами водохранилищ связана со значительным ущербом от наводнений на протяжении нижних бьефов гидроузлов. При этом особого внимания требуют вопросы надежности подпорных сооружений и режима пропуска через гидроузлы высоких половодий и паводков. Рассматриваемый раздел должен быть увязан с соответствующим разделом декларации безопасности гидротехнических сооружений гидроузла, составляемой в соответствии с требованиями Федерального закона РФ «О безопасности гидротехнических сооружений».

Основной задачей пропуска высоких половодий и паводков через гидроузел или каскад гидроузлов является определение максимальных уровней водохранилища и максимальных расходов воды, сбрасываемых в нижние бьефы гидроузлов.

Социально значимым последствием регулирования стока половодий и летне-осенних паводков водохранилищем является гарантированная защита населения от наводнений и создание при этом благоприятных условий для развития прибрежных городов и населенных пунктов.

Регулирование паводочного стока осуществляется объемом водохранилища, предназначенным для ежегодной обязательной сработки и наполнения, а именно: при сезонном регулировании – полным полезным объемом; при многолетнем – сезонной составляющей полезного объема. Следовательно, для регулирования стока весеннего половодья, время наступления и объем которого прогнозируется с достаточной заблаговременностью, используется тот же полезный объем водохранилища, что и для повышения меженного стока.

Летне-осенние паводки формируются под действием обильно выпадающих дождей. Время наступления и объем их трудно поддаются надежному прогнозированию. Поэтому пропуск расчетного

летне-осеннего паводка осуществляется, как правило, с отметки НПУ, т.е. при наполненном водохранилище.

Для дополнительной срезки расчетных половодий и регулирования летне-осенних паводков используется объем форсировки, заключенный в диапазоне уровней водохранилища от НПУ до ФПУ (форсированный подпорный уровень). Высота допустимой форсировки устанавливается на основании технико-экономического сопоставления ряда вариантов количества и размеров водопропускных отверстий гидроузла и соответствующих им высоты его глухой плотины. В зависимости от топографической характеристики водохранилищ и располагаемого объема форсировка уровней над НПУ колеблется от 1 м (гидроузлы на р. Волге, р. Иртыше) до 3,0 м (Вилуйский гидроузел на р. Вилуе), а объем призм форсировки достигает 15% полезного объема водохранилища.

Объем водохранилища над НПУ предназначается только для срезки расчетных максимальных расходов воды и не используется для повышения низкого меженного стока или уменьшения максимальных расходов рядовых половодий и паводков. Поэтому после прохождения пика половодья или паводка необходимо произвести его сброску (на спаде половодья или паводка).

## **15.2. Расчеты пропуска стока половодий и паводков через гидротехнические сооружения**

Пропуск половодий и паводков через гидротехнические сооружения регламентируется следующими действующими нормативными документами:

1. Определение основных расчетных гидрологических характеристик СП-33-101-2003. Издание официальное, Госстрой России. М., 2004.

2. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 233-01-2003. Госстрой России. М., 2004.

В соответствии с этими документами ежегодная вероятность превышения максимальных расходов воды устанавливается в зависимости от класса сооружений для двух расчетных случаев – основного и поверочного, согласно табл. 15.1.

Пропуск расчетного расхода воды для основного расчетного случая должен обеспечиваться, как правило, при НПУ через экс-

платационные водосбросные устройства при полном их открытии, все гидротурбины ГЭС и через другие водопропускные сооружения.

Таблица 15.1.

Ежегодные вероятности превышения расходов воды $p\%$				
Расчетный случай	Класс сооружения			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Поверочный	0,01 с гарантийной поправкой	0,1	0,5	1,0

Пропуск расчетного расхода воды для поверочного расчетного случая надлежит обеспечивать при наивысшем технически и экономически обоснованном форсированном подпорном уровне (ФПУ) всеми водопропускными сооружениями гидроузла, включая эксплуатационные водосбросы, гидротурбины ГЭС, водозаборные сооружения, судоходные шлюзы, рыбопропускные сооружения и резервные водосбросы. При этом в связи с кратковременностью прохождения пиков половодья и паводка допускается: уменьшение выработки электроэнергии ГЭС; размыв русла и береговых склонов в нижнем бьефе гидроузла, не угрожающий разрушением основных сооружений; повреждение резервных водосбросов.

Исходными данными для проведения расчетов пропуска половодий и паводков являются: расчетный гидрограф притока, основные элементы которого (максимальный расход, объем основной волны и всего половодья или паводка) отвечают вероятности превышения по табл. 15.1; кривая объемов или интерполяционная таблица объемов водохранилища в зависимости от подпорных уровней; вариантно задаваемые кривые пропускной способности гидротехнических сооружений.

Сброс воды из водохранилища производится через отверстия, предназначенные для пропуска полезно используемых расходов воды (гидроэлектростанция, шлюз, забор воды на водоснабжение и орошение) ( $Q_{\text{плт}}$ ), и через отверстия, предназначенные для пропуска избыточной воды (поверхностные водосливы и донные водосбросы) ( $Q_{\text{вс}}$ ). Расчеты пропуска высоких половодий и паводков через гидроузел, как правило, выполняются табличным балансовым способом, основанном на решении уравнения неразрывности для водохранилищ:

$$\frac{Q_1 + Q_2}{2} \Delta t = \frac{q_1 + q_2}{2} \Delta t + \Delta V \quad (15.1.)$$

или

$$\Delta V = (Q - q) \Delta t. \quad (15.2.)$$

Здесь  $Q_1$  и  $q_1$  – приточный и сбросной расходы воды в начале интервала  $\Delta t$ ;  $Q_2$  и  $q_2$  – то же в конце его;  $\Delta V = V_2 - V_1$  – приращение объема водохранилища за интервал  $\Delta t$ ;  $Q$  – средний расход притока за интервал  $\Delta t$ ;  $q$  – средний сбросной расход воды за интервал  $\Delta t$ ;  $\Delta t$  – расчетный интервал времени. Средний сбросной расход воды  $q$  представляет собой сумму средних расходов воды, пропускаемых через гидротурбины или другие отверстия, полезно использующие воду ( $Q_{плз}$ ), и средних расходов воды, сбрасываемых через водослив или водосброс ( $Q_{вс}$ ):  $q = Q_{плз} + Q_{вс}$ .

Расчеты пропуска половодий выполняются, как правило, по срезочной схеме, которая сводится к следующему: от отметки ежегодной сработки водохранилища до отметки НПУ в зависимости от интенсивности наполнения водохранилища в нижний бьеф гидроузла сбрасывается расход воды либо гарантированный, либо соответствующий полной пропускной способности ГЭС. Полное раскрытие водосброса, как правило, предусматривается после наполнения водохранилища до НПУ. Однако в ряде случаев для снижения уровней над НПУ при пропуске расчетного половодья допускается открытие водосброса при отметке ниже НПУ.

Расходы притока определяются по расчетному гидрографу. С момента раскрытия водосброса приращение уровней у плотины на текущие  $\Delta t$  неизвестно, расчет пропуска половодья осуществляется методом последовательного приближения (подбора) в табличной форме (табл. 15.2) в следующей последовательности: на конец  $\Delta t$  задаются уровнем у плотины  $Z_{к.з}$  и определяют средний уровень  $Z_{ср} = (Z_{н} + Z_{к.з})/2$ ; по  $Z_{ср}$  находят средний расход водосброса  $Q_{вс}$ ; рассчитывают суммарный сбросной расход воды из водохранилища  $q = Q_{полезн} + Q_{вс}$ ; разность расходов притока и сбросного дает расход аккумуляции (приращение)  $Q_{акк} = Q - q$ ; приращение объема водохранилища  $\Delta V_{акк} = Q_{акк} \Delta t$ ; наполнение водохранилища на конец  $\Delta t$  равно  $V_k = V_n + \Delta V_{акк}$ ; по  $V_k$  с кривой объемов снимают  $Z_k$ . Если  $Z_k$  не совпадает с  $Z_{к.з}$ , расчет повторяют до совпадения этих величин.

Таблица 15.2

Расчет пропуска половодья вероятностью превышения 0,01% с гарантией поправкой через гидрозел НПУ 143 м, уровень ежегодной сброски 125 м, открытые водосбросы с отн. 140 м, полная пропускная способность ГЭС 7200 м<sup>3</sup>/с

Дата	Средний расход притока $Q$ , м <sup>3</sup> /с	Средний расход ГЭС, м <sup>3</sup> /с	Средний расход водосброса $Q_{вс}$ , м <sup>3</sup> /с	Средний сбросной расход $q = Q_{ГЭС} + Q_{вс}$ , м <sup>3</sup> /с	Расход аккумуляции $Q_{акк} = \bar{Q} - q$ , м <sup>3</sup> /с	Объем аккумуляции $\Delta V_{акк} = \bar{Q}_{акк} \Delta t$ , км <sup>3</sup>	Наполнение водохранилища на конец $\Delta t$ $V^k = V^n + \Delta V_{акк}$ , км <sup>3</sup>	Уровень $Z_k$ м плотина на конец $\Delta t$	Средний уровень $Z_{ср} = (Z^n + Z^k)/2$ , м у плотины
14/VI	8 290	7200		7 200	1 090	0,09	42,86	125	
15/VI	9 610	7200		7 200	2 410	0,21	42,95	125,07	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7/VI	36 000	7200		7 200	28 800	2,49	68,39	140,48	141,10
8/VI	40 700	7200	5 800	13 000	27 700	2,39	70,78	141,73	142,42
9/VI	44 600	7200	5 800	13 000	31 600	2,73	73,51	143,11	143,57
10/VI	41 400	7200	12 300	19 500	21 900	1,89	75,40	144,04	144,31
11/VI	33 700	7200	13 750	20 950	12 750	1,10	76,50	144,58	144,71
12/VI	28 000	7200	14 500	21 700	6 300	0,55	77,05	144,84	144,86
13/VI	22 700	7200	14 800	22 000	700	0,06	77,11	144,87	
Сумма	686440			290 150	396 290	34,25			

Расчеты пропуска половодий начинаются с даты, на которую расход притока превышает расход полной пропускной способности ГЭС.

С целью проверки правильности проведенных расчетов в конце таблицы обязательно производится подсчет сумм расходов притока, сбросных расходов, расходов и объемов аккумуляции. Суммарный расход аккумуляции должен быть равен разности суммарных расходов притока и сбросных расходов, а суммарный объем аккумуляции – произведению суммарного расхода аккумуляции на число секунд в сутках. Суммарный объем аккумуляции должен соответствовать разности наполнений водохранилища на конец и начало расчетов.

По данным таблицы строят графики, приведенные на рис. 15.1.

На реках с каскадным расположением гидроузлов расчетный максимальный расход воды проектируемого гидроузла должен определяться с учетом класса его постоянных гидротехнических сооружений. Во всех случаях, независимо от класса, сооружений гидроузлов, расположенных в каскаде, пропуск расхода воды основного расчетного случая не должен приводить к нарушению нормальной эксплуатации основных гидротехнических сооружений ниже расположенных гидроузлов.

В случае если класс основных гидротехнических сооружений проектируемого гидроузла ниже класса сооружений вышерасположенного гидроузла, допускается пропуск расчетного расхода воды поверочного случая через проектируемый гидроузел обеспечивать путем увеличения его водопропускной способности без повышения класса. При проведении расчетов пропуска половодий и паводков через каскад гидроузлов с регулирующими водохранилищами необходимо предварительно рассчитать и построить гидрографы притока к верхнему гидроузлу каскада и боковой приточности между гидроузлами. Расчетный приток к нижерасположенному гидроузлу в каскаде определяется как сумма расходов воды, сбрасываемых в нижний бьеф вышерасположенного гидроузла, и боковой приточности с водосбора между ними. При этом вероятность превышения максимальных расходов и объемов притока к нижерасположенному гидроузлу должна соответствовать нормативной вероятности.

Методические трудности построения гидрографа притока к гидроузлам и участкам реки, расположенным выше рассматриваемого створа, состоят в неопределенности обеспеченности (вероятности пре-

вышения) максимальных расходов воды и объемов стока приточности с участков водосбора, формирующих половодный или паводочный сток нормируемой вероятности превышения в замыкающем створе.

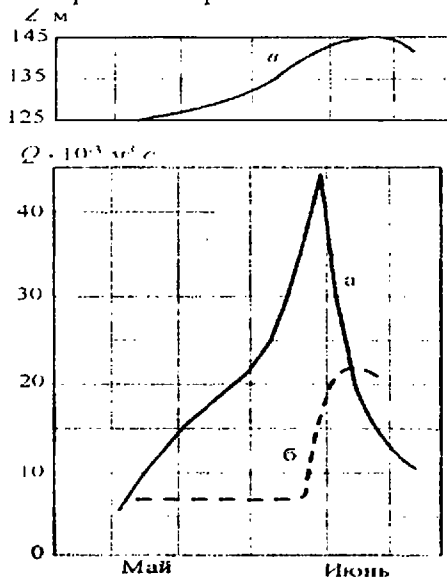


Рис. 15.1. Схема пропуска расчетного половодья через гидроузел.  
*a* – гидрограф притока, *б* – график сбросных расходов воды,  
*в* – ход уровней водохранилища.

В настоящее время в проектной практике используются два способа определения проектного притока к створам проектируемых гидроузлов в каскаде.

**1. Метод «остаточного объема»**, используемый в каскаде из двух гидроузлов, сооружения которых отнесены к одному и тому же классу. Метод сводится к реализации уравнения

$$W_{2p} = W_{1p} + W_{6.пр.p(1-2)},$$

где  $W_{2p}$  и  $W_{1p}$  – объемы стока за весенне-дождевой период в створах гидроузлов соответственно нижнего (2) и верхнего (1) нормативной вероятности превышения  $p$ ;  $W_{6.пр.p(1-2)}$  – объем боковой приточности на участке 1–2 за тот же период неизвестной вероятности превышения  $p_{(1-2)}$ .

Зная  $W_{2p}$  и  $W_{1p}$ , определяют  $W_{6,пр p(1-2)}$  и по кривой распределения объемов стока боковой приточности (параметры которой предварительно рассчитаны) снимают  $p_{(1-2)}$ , соответствующую  $W_{6,пр}$ .

Обеспеченность максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков принимается равной обеспеченности объемов стока за весенне-дождевой период.

Порядок расчета следующий.

1) По полному ряду наблюдений за стоком определяют статистические параметры (среднее значение,  $C_v$ ,  $C_s/C_v$ ) максимальных расходов весеннего половодья и дождевых паводков, а также объемов стока за весенне-дождевой период в створах верхнего (1) и нижнего (2) гидроузлов и боковой приточности между ними.

2) По разности объемов стока вероятностью превышения 0,01% с гарантийной поправкой (г. п.) (для первого класса сооружений) в створах 2 и 1 определяют так называемый *остаточный объем* и по кривой распределения объемов бокового притока – соответствующую ему расчетную обеспеченность (вероятность).

3) По нескольким, наиболее неблагоприятным моделям весенних половодий и дождевых паводков известными способами рассчитывают и строят гидрографы притока вероятностью превышения 0,01% с г. п. к створу верхнего гидроузла (1) и боковой приточности рассчитанной вероятности превышения.

4) Трансформируя гидрографы весеннего половодья и дождевого паводка водохранилищем верхнего гидроузла, получают соответствующие гидрографы сбросных расходов в его нижнем бьефе.

5) Суммируя гидрографы сбросных расходов весеннего половодья и дождевых паводков с соответствующими гидрографами боковой приточности, получают гидрографы притока к нижнему гидроузлу вероятностью 0,01% с г. п.

6) Трансформируя последние водохранилищем в створе нижнего гидроузла, получают гидрографы сбросных расходов воды при пропуске расчетных расходов весеннего половодья и дождевого паводка в замыкающем створе каскада. В качестве расчетных принимаются наибольшие значения максимальных уровней водохранилища и максимальных сбросных расходов.

**2. Метод, разработанный специалистами Гидропроекта и использованный для определения проектного притока к створу Средне-Енисейской ГЭС на р. Енисее в условиях регулирования**

стока р. Ангары Иркутским, Братским, Усть-Илимским и Богучанским водохранилищами, а стока Енисея – Красноярским водохранилищем. Построение гидрографов для всех участков каскада выполнялось по моделям многоводных половодий реальных лет – общих для всех ступеней с приведением к объему стока расчетной обеспеченности в замыкающем створе.

Для примера ниже приведены расчеты вероятности превышения составляющих суммарного притока к замыкающему гидроузлу в каскаде на примере Енисейского каскада гидроэнергетических установок.

В состав Енисейского каскада входят (сверху вниз) Саяно-Шушенский гидроузел (в дальнейшем СШГЭС) с водохранилищем годичного регулирования стока; Майнский, осуществляющий точное регулирование, и Красноярский гидроузел (в дальнейшем КГЭС) с водохранилищем многолетнего регулирования стока. Регулирование половодий на р. Енисей производится Саяно-Шушенским и Красноярским водохранилищами.

Приток к створу КГЭС складывается из суммы сбросных расходов в створе СШГЭС и бокового притока с участка между ними. Гидроузлы на р. Енисей отнесены к I классу сооружений, поэтому вероятность превышения максимальных расходов и объемов половодья для поверочного случая принята 0,01% с гарантийной поправкой (г. п.). Остается неясной вероятность превышения расходов и объемов половодья боковой приточности, которая в сумме со сбросными расходами СШГЭС обеспеченностью 0,01% с г. п. давала бы расходы и объемы половодья в створе КГЭС той же обеспеченности.

Математически, исходя из теории вероятности, казалось бы, что если при определении притока ко второй ступени каскада принять одинаковую вероятность превышения притока к верхнему гидроузлу и боковой приточности между первым и вторым гидроузлами, например 0,01%, то вероятность превышения суммарного притока ко второму гидроузлу может составить 0,0001%. Это справедливо при отсутствии корреляционной связи между составляющими суммарного притока к замыкающему створу.

Для реализации двух вышеуказанных способов определения вероятности превышения расходов и объемов половодья боковой приточности по полному ряду наблюдений за стоком р. Енисей были рассчитаны статистические параметры (среднее значение,  $S$ ,

$C_v/C_v$ ) объемов стока за весенне-дождевой период (май – сентябрь) в створах СШГЭС и КГЭС, а также боковой приточности между ними. Результаты расчетов сведены в табл. 15.3.

Таблица 15.3

Основные статистические характеристики объемов стока за весенне-дождевой период ( $n$  – период наблюдений;  $W$  – средний за период объем стока, км<sup>3</sup>;  $W_p$  – максимальный объем вероятностью превышения, км<sup>3</sup>)

Створ	$n$	$W$	$C_v$	$C_v/C_v$	$W_p$		
					0,01% г.п.	0,01%	0,1%
СШГЭС	1903-04 1999-00	37,9	0,16	2	67,6	65,2	59,5
Боковая приточность	1903-04						
КГЭС	1990-91 1903-04 1990-91	32,1	0,17	2	59,06	56,8	51,7
		69,2	0,16	2	124,4	119,7	108,6

По разности объемов стока вероятностью превышения 0,01% с г.п. в створах КГЭС и СШГЭС определен остаточный объем (боковой приточности), равный 56,8 км<sup>3</sup>.

По табл. 15.3 расчетная обеспеченность его соответствует 0,01%.

Обеспеченность максимальных расходов воды весеннего половодья принимается равной обеспеченности объемов стока за весенне-дождевой период.

Для расчета вероятности превышения составляющих суммарный приток к створу Красноярского гидроузла вторым способом отбираем из ряда наблюдений модели самых многоводных лет – в данном случае 1936, 1941 и 1966 гг. Объем гидрографа половодно-дождевого периода в створе Красноярского гидроузла принимаем за 100% и рассчитываем проценты естественного распределения стока между его составляющими. Затем объем стока нормируемой обеспеченности в створе Красноярского гидроузла, принимаемый также за 100%, распределяем между его составляющими исходя из ранее определенного естественного процента распределения.

По табл. 15.3 определяем для полученных таким способом объемов стока в створах СШГЭС и КГЭС и боковой приточности расчетную их обеспеченность. Результаты проведенного анализа по моделям многоводных лет представлены в табл. 15.4.

Анализ данных таблицы показывает, что вероятность превышения объемов весеннего половодья СШГЭС и боковой приточно-

сти к створу КГЭС только в 1941 г. составила соответственно 0,01% и 0,01% с г.п. в остальные многоводные годы больше 0,01%, но меньше 0,01% с г.п. С точки зрения безопасности гидротехнических сооружений лучше вероятность превышения объемов весенне-дождевого периода в створе СШГЭС и боковой приточности принять соответствующей в створе КГЭС, т.е. 0,01% с г.п.

Таблица 15.4

**Распределение вероятностей превышения объемов весенне-дождевого периода между составляющими суммарного притока к створу Красноярского гидроузла по моделям многоводных лет**

( $W$  – естественный объем, км<sup>3</sup> и% его распределения;  $W_p$  – величина обеспеченных объемов стока, км<sup>3</sup>;  $p$  – их расчетная обеспеченность,%)

Год	Створ	$W$	%	$W_p$	$p$
1936	СШГЭС	51,9	53,1	66,1	между 0,01 и 0,01 с г.п. между 0,01 и 0,01 с г.п. 0,01 с г.п.
	Боковая приточность	45,8	46,9	58,3	
	КГЭС	97,7	100,0	124,4	
1941	СШГЭС	48,9	52,3	65,1	0,01
	Боковая приточность	44,6	47,7	59,3	0,01 с г.п.
	КГЭС	93,5	100,0	124,4	0,01 с г.п.
1966	СШГЭС	54,5	53,4	66,4	между 0,01 и 0,01 с г.п. между 0,01 и 0,01 с г.п. 0,01 с г.п.
	Боковая приточность	47,5	46,6	58,0	
	КГЭС	102,0	100,0	124,4	

Это вполне возможно, учитывая высокие коэффициенты корреляции между расходами в створе СШГЭС и боковой приточности, боковой приточности и расходами в створе КГЭС, расходами в створе СШГЭС и КГЭС, равными соответственно 0,77; 0,87 и 0,90.

Таким образом, второй способ даст более повышенную вероятность превышения объемов и расходов весенне-дождевого периода для боковой приточности по сравнению с методом «остаточного объема». Делать при этом какие-то окончательные выводы в отношении используемых способов преждевременно. Второй способ требует проверки на более длительном ряду наблюдений за стоком и для большего числа моделей многоводных лет.

Техника дальнейших расчетов простая. По моделям многоводных половодий и действующим нормативам рассчитываем и строим гидрографы половодий в створе СШГЭС и боковой приточности расчетной обеспеченностью 0,01% с г.п. Затем трансформируют

построенные гидрографы половодий в створе СШГЭС. Суммируя гидрографы сбросных расходов в створе СШГЭС с гидрографом боковой приточности, получают гидрограф притока к створу КГЭС. Рассчитанные гидрографы притока к створу КГЭС по трем моделям многоводных лет трансформируют по принятым диспетчерским правилам пропуска расчетных половодий. В качестве расчетной принимают ту модель, по которой определяется наибольший форсированный уровень водохранилища и наибольший сбросной расход. В данном примере такой моделью является многоводный 1941 г., отличающийся самым неблагоприятным внутриводоходным распределением стока. Результаты пропуска расчетного половодья через КГЭС приведены в табл. 15.5.

Таблица 15.5

**Результаты пропуска половодья через КГЭС**

( $Q_{\text{макс}}$  – максимальный естественный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{пр}}$  – максимальный приточный расход воды при работе с СШГЭС, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{сбр}}$  – максимальный сбросной расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{ГЭС}}$  – расход ГЭС, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta Z$  – величина форсировки уровней верхнего бьефа над НПУ – 243 м, м;  $\Delta Q$  – уменьшение максимальных расходов воды, м<sup>3</sup>/с)

Показатель	Величина
$Q_{\text{макс}}$	45 700
$Q_{\text{пр}}$	33 400
$Q_{\text{сбр}}$	21 600
В том числе $Q_{\text{ГЭС}}$	7 200
$\Delta Z$	1,8
$\Delta Q_{\text{макс}}$	24 100
$\Delta Q_{\text{пр}}$	11 800

Вероятность превышения объемов и расходов воды дождевых паводков в створах СШГЭС и боковой приточности принимается также соответствующей в створе КГЭС, т.е. 0,01% с г.п. Пропуск их осуществляется с отметки НПУ при полном раскрытии водосброса или с ограничением максимальных сбросных расходов, если таковые имеются. Значительно уступая по объему половодьям, пропуск дождевых паводков через гидроузлы СШГЭС и КГЭС производится при меньших по сравнению с половодьем форсированных уровнях водохранилища.

Определенную угрозу безопасности гидротехническим сооружениям представляет изменение параметров максимального стока во времени.

Этому вопросу в настоящее время уделяется значительное внимание. Это связано прежде всего с участвовавшими случаями прорыва плотин и последующими масштабными социальными, экологическими и экономическими последствиями. Большая часть прорывов плотин произошла из-за переливов воды через гребень плотины. Причиной подобных переливов является занижение в проекте максимальных расходов и объемов половодий и паводков. Занижение максимальных расходов воды вызвано тем, что параметры максимального стока определяются, как правило, по коротким стокowym рядам, включающих затяжные маловодные периоды.

Рассмотрим это на примере Вилюйского гидроузла, расположенного в 1345 км от устья р. Вилюй. Первый агрегат Вилюйской ГЭС введен в эксплуатацию в 1967 г., а на полную мощность ГЭС пущена в 1976 г.

Основные параметры гидроузла, включая пропускную способность водосброса, рассчитаны и обоснованы на базе исходной гидрологической информации за период с 1926 по 1966 г.

Анализ водности р. Вилюй показал, что период с 1934 по 1972 г. являлся маловодным, а с 1973 г. начинается многоводный период, продолжающийся до настоящего времени. Максимальный расход половодья 1992 г. составил  $16\,200\text{ м}^3/\text{с}$  и превысил исторический максимум 1890 г., равный  $14\,000\text{ м}^3/\text{с}$ . Максимальный расход в среднем за период с 1934 по 1972 г. составил  $6500\text{ м}^3/\text{с}$ , а за период с 1973 по 1998 г. –  $8900\text{ м}^3/\text{с}$ .

Параметры максимального стока весенних половодий за периоды до ввода ГЭС и с учетом последних лет сведены в табл. 15.6.

При этом параметры максимального стока дождевых паводков практически остались без изменений.

Значительное увеличение максимальных расходов, а следовательно, и объемов весенних половодий вызвало необходимость разработки новой диспетчерской схемы пропуска расчетного половодья  $0,01\%$  с г.п. через гидроузел исходя из его безопасности.

Проведенные многовариантные расчеты показали:

– для пропуска половодья  $0,01\%$  с г.п. без превышения форсированного подпорного уровня 249 м необходимо к началу половодья произвести углубленную сработку водохранилища с уровня ежегодной сработки 241,2 м до отметки 239, т.е. на 2,2 м или в объеме  $4\text{ км}^3$ ;

– открытие водосброса необходимо произвести с отметки 239 м.

Произвести углубленную предполоводную сработку водохранилища в апреле не представляется возможным, так как на Вилкое стоит ледостав, и увеличение сбросных расходов вызовет искусственный ледоход с возможным заторным подъемом уровня, вода пойдет поперек льда, что вызовет зимнее наводнение.

Таблица 15.6

Характеристика	Период	
	1926–1966 гг.	1926–2000 гг.
1. Среднегодовой максимальный расход воды половодья, м <sup>3</sup> /с	6600	7640
2. Коэффициент изменчивости стока	0,31	0,33
3. Коэффициент асимметрии стока	$C_s = 2C_v$	$C_s = 3C_v$
4. Максимальный расход половодья вероятностного превышения 0,01% с гарантийной поправкой (г.п.)	18 700	21 600

Наиболее кардинальными мероприятиями в этом случае являются или снижение НПУ и соответствующего предполоводного уровня на 2 м или повышение гребня плотины на 0,6 – 0,8 м.

Окончательное решение этого вопроса требует дополнительных проработок.

### 15.3. Основные положения выбора противопаводкового (резервного) объема водохранилища

Наиболее активным средством борьбы с наводнениями является регулирование стока паводков водохранилищами.

Создание любого водохранилища неизбежно снижает максимальный сток реки, даже если цель борьбы с наводнениями не преследуется специально. Однако в этом случае срезка паводков может носить случайный характер, не контролируемый во времени и по объему сброса воды.

Для достижения надежного эффекта с устойчивым режимом расходов воды в нижнем бьефе гидроузла в водохранилищах комплексного назначения выделяется специальный резервный (противопаводковый) объем для аккумуляции стока в паводки редкой повторяемости или наступающие в конце сезона, после заполнения основного объема водохранилища. Противопаводковый объем водохранилища используется исключительно для аккумуляции ливне-

вых летних паводков, проходящих, как правило, когда водохранилище уже заполнено до НПУ, и срезки максимальных расходов воды в целях защиты от затопления нижерасположенных земель. Противопаводковый объем определяется объемом расчетного дождевого паводка вероятностью превышения 1% и контрольным максимальным сбросным расходом в створе гидроузла, определяющим срезку максимальных расходов в нижнем бьефе. Это связано с основным требованием к режиму регулирования стока – ограждению от наводнений сельскохозяйственных угодий, затопление которых допускается существующими нормативными документами не чаще чем 1 раз в 100 лет. К выбору противопаводкового (резервного) объема выполняются расчеты пропуска максимального стока через гидроузел для нескольких вариантов контрольного сбросного расхода воды вероятностью превышения 1%, которые служат основой для определения ущербов от затоплений в нижнем бьефе и дополнительных затрат по сооружениям и водохранилищу.

Окончательный выбор противопаводкового объема водохранилища производится экономическим сравнением прироста затрат по гидроузлу в связи с размещением вариантно рассчитанных дополнительных объемов водохранилища со снижением ущербов от наводнений при соответствующих вариантных значениях сбросных расходов воды вероятностью превышения 1% (с учетом трансформации их руслом и поймой на протяжении нижнего бьефа). При этом, как правило, приросты затрат по гидроузлу и получаемого при этом эффекта относятся к  $1 \text{ км}^3$  аккумулирующего объема водохранилища. На рис. 15.2 для примера показаны кривые изменения затрат по гидроузлу и получаемого эффекта на  $1 \text{ км}^3$  резервного объема для одного из проектируемых Ленгидропроектном дальневосточных водохранилищ. Оптимальное значение резервного (противопаводкового) объема соответствует точке пересечения приведенных кривых. Как видно из рисунка, оптимальный резервный объем для рассматриваемого водохранилища  $2,9 \text{ км}^3$ .

После заполнения резервного объема сработка его производится, как правило, при полном открытии водосброса. В случае наличия резервного объема условия пропуска расчетного паводка будут отличаться от условий, принятых при его отсутствии, т.е. по так называемой энергетической схеме. В этом случае при уровнях воды в водохранилище от НПУ до соответствующих заполненному резервному объему расходы в нижний бьеф, пропускаемые через ГЭС

и водосброс, не превышают контрольного расхода, соответствующего принятому резервному объему. После этого водосброс раскрывается полностью. Естественно, что при этом форсированные подпорные уровни водохранилища и соответствующие им максимальные сбросные расходы будут повышаться по сравнению с вариантом без резервного объема.

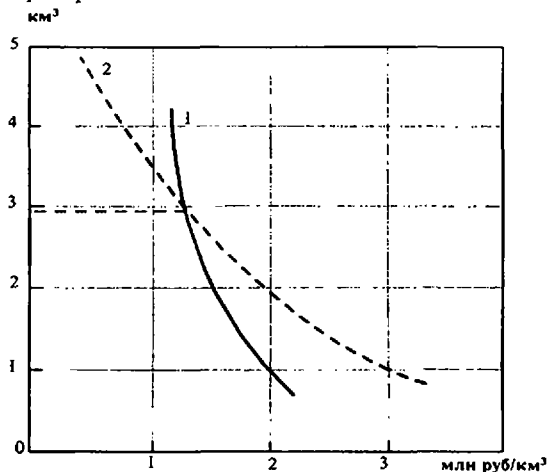


Рис. 15.2. Выбор противопаводкового объема водохранилища.

1 - затраты по гидроузлу, 2 - ущербы в нижнем бьефе.

Рассмотрим это на примере одного из дальневосточных водохранилищ, на котором предполагалось разместить дополнительный противопаводковый объем. Основные параметры водохранилища ГЭС: НПУ – 256,0 м, УМО – 236 м, полезный объем – 11,5 км<sup>3</sup>. Результаты вариантных расчетов сведены в табл. 15.7.

Таблица 15.7

Максимальные уровни водохранилища и максимальные сбросные расходы при пропуске паводка вероятностью превышения 0,01% с г.п.

Характеристика	Вариант расчета		
	1	2	3
Максимальный уровень водохранилища, м	263	264	265,5
Максимальный сбросный расход, м <sup>3</sup> /с	19 100	20 600	22 800

Примечания: 1 – энергетический вариант расчета; 2 – контрольный расход – 7000 м<sup>3</sup>/с, а дополнительный объем для его обеспечения 1,12 км<sup>3</sup>; 3 – контрольный расход – 4500 м<sup>3</sup>/с, а дополнительный объем – 2,81 км<sup>3</sup>.

Из таблицы видно, что чем больше противопаводковый резервный объем, тем выше форсированный подпорный уровень по отношению к энергетическому варианту.

В заключении хочется отметить весьма высокую эффективность одного из крупнейших в России Зейского противопаводкового водохранилища. При снижении повторяемости катастрофических наводнений в 5 – 10 раз среднегодовой ущерб в бассейне р. Зeya уменьшился в 3 раза.

#### **15.4. Регулирование паводков распределенной системой водохранилищ с учетом экологических факторов**

Создание крупных противопаводковых водохранилищ не может являться основным решением проблем борьбы с наводнениями, поскольку у данного способа имеется ряд существенных недостатков, наиболее важные из них:

- значительные площади речного бассейна, расположенные выше створа основных сооружений, оказываются затопленными или подтопленными;
- остаются незащищенными верховые участки реки;
- негативные экологические последствия, связанные с большой площадью затоплений.

Поэтому в целях максимально возможной защиты речного бассейна от затоплений, вызванных паводками, при минимизации воздействий водохранилищ на водосбор более предпочтительной является вариант схемы регулирования паводков системой водохранилищ. Такая схема предусматривает сооружение на основной реке водохранилища и ГЭС, а на притоках – так называемых временно заполняемых водохранилищ. "Веерная" система водохранилищ применима в случае, когда значительная часть паводка формируется на боковых притоках.

Переход от крупных гидроузлов с водохранилищами глубокого регулирования стока к системе (каскаду) низконапорных гидроузлов с небольшими временно заполняемыми водохранилищами, расположенными как в русле основного водотока, так и на его притоках, является весьма перспективным.

Переход от одиночных крупных гидроузлов к "веерной" системе водохранилищ позволяет:

- защитить от наводнений большую часть бассейна реки;

- снизить затопляемость земель по основному русловому водохранилищу за счет снижения его подпорных уровней;
- распределить по водосбору антропогенную нагрузку на природные комплексы, при этом она становится более "мягкой".

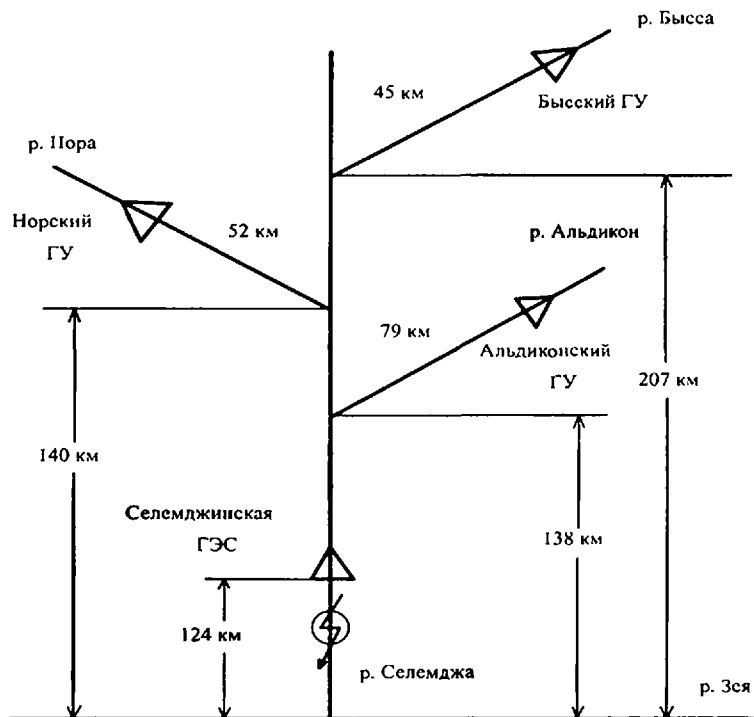


Рис. 15.3. Схема регулирования паводковых расходов реки Селемджа русловым водохранилищем и временно заполняемыми водохранилищами на боковых притоках.

Единственная в России расчетная схема противопаводковых мероприятий через распределенную систему водохранилищ разработана применительно к бассейну р. Селемджи коллективом кафедры возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского политехнического университета.

Схема регулирования паводковых расходов воды р. Селемджи русловым водохранилищем и временно затопляемыми водохранилищами на боковых притоках представлена на рис. 15.3.

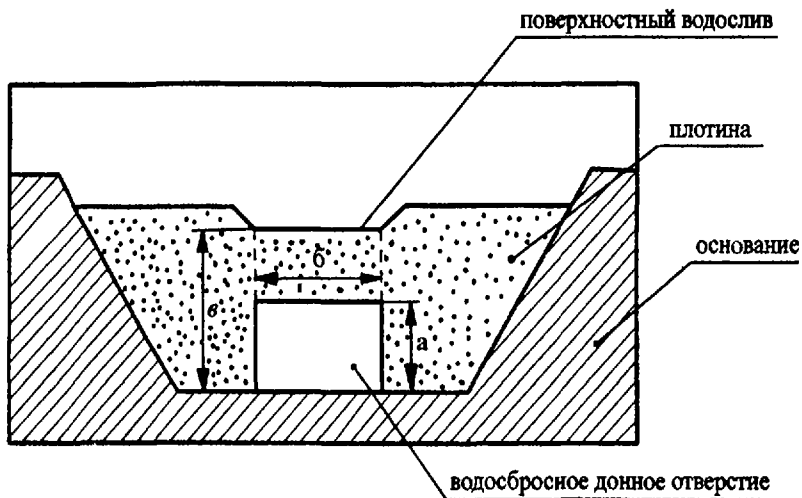


Рис. 15.4. Расчетная схема водопропускного сооружения противопаводкового ГУ:  
 $a$  – высота отверстия, м;  $b$  – ширина порога, м;  $в$  – высота порога, м.

Расчетная схема водопропускного сооружения противопаводкового гидроузла на притоках приведена на рис. 15.4. Здесь надо отметить, что пропускная способность донного отверстия и поверхностного водослива рассчитывается таким образом, чтобы суточная интенсивность подъема и спада уровней при прохождении паводка 1%-й обеспеченности не вызвала активизации оползневых процессов.

Эффект разработанной системы с временно заполняемыми противопаводковыми гидроузлами на трех притоках и русловым селемджинским гидроузлом на р. Селемдже выразился в снижении форсированного подпорного уровня при пропуске 1%-го паводка с 221,0 м (одиночный гидроузел) до 217,3 м (в каскаде). При этом площадь затоплений снизилась с 540 до 400 км<sup>2</sup> или на 30%.

Однако расчетная схема имеет и ряд недостатков.

При создании предлагаемой системы водохранилищ особенно остро встает проблема выбора и распределения по бассейну противопаводковой емкости для аккумуляции стока в паводки редкой по-

вторяемости. В основу такого распределения противопаводковых емкостей должен быть положен принцип максимально возможной срезки расчетных паводковых расходов воды при минимизации воздействия водохранилищ на природные комплексы. К сожалению, обоснования такого распределения в предлагаемой расчетной схеме не приведено. Схема реализуется применительно к условиям равновероятностного формирования ливневых паводков на водосборе, не учитывая возможную асинхронность паводкового стока в пределах речного бассейна из-за неравномерного по площади выпадения осадков.

Слабо изучено негативное воздействие низконапорных и саморегулирующихся водохранилищ на водосборе, хотя очевидно оно имеет место.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Какие цели преследует регулирование стока высоких паводков и паводков?
2. Какими нормативными документами регламентируется выбор расчетной обеспеченности паводков и паводков?
3. Назовите основные исходные данные для проведения расчетов пропуска паводков и паводков.
4. Общая схема расчетов пропуска высоких паводков и паводков через гидроузлы.
5. В чем заключаются трудности расчетов трансформации паводков и паводков каскадно расположенными водохранилищами?
6. Какова роль противопаводкового (резервного) объема водохранилищ и методы его определения?
7. В чем состоит эффективность так называемой "верной" системы водохранилищ в борьбе с паводками в пределах речного бассейна?
8. Назовите основные нерешенные проблемы при разработке данной системы водохранилищ.

## **Глава 16. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

### **16.1. Оценка влияния водохранилища на гидрологический режим в нижнем бьефе гидроузла**

Результатом регулирования стока водохранилищами гидротехнических установок является сближение максимальных естественных расходов (уровней) воды в период половодья и резкое увеличение межениных расходов воды, особенно в зимний период. Наблюдаемое изменение водного режима и соответственно теплового потока приводит к изменению ледо-термического режима реки на протяжении нижнего бьефа, а именно – сроков вскрытия и замерзания реки, толщины льда, продолжительности ледостава. Это негативно сказывается на жителях прибрежных районов, так как нарушаются ледовые переправы, а за счет увеличения влажности воздуха активизируются острые респираторные заболевания. Поэтому при проектировании и эксплуатации водохранилищ гидроузлов чрезвычайно важно знать, какова степень воздействия водохранилищ на водный и ледо-термический режим реки и на каком удалении от гидроузла выявленное влияние затухает.

Обычно необходимые сведения о зарегулированных расходах и уровнях воды на протяжении нижнего бьефа гидроузла получают путем численного решения основных уравнений Сен-Венана. Эти расчеты весьма трудоемки и требуют подробной информации о русле и пойме на значительном удалении от гидроузла, поэтому чаще всего не могут быть применены.

Упрощенные же методы расчета, исключаящие необходимость морфометрических характеристик русла, разработаны для призматических русел и на реках с пойменными участками могут привести к значительным погрешностям. Практические приемы использования упрощенных методов расчета для оценки изменения расходов (уровней) воды в нижнем бьефе гидроузла подробно изложены с примерами в [7, 8]. Следует отметить, что использование этих методов не позволяет дать оценку изменения ледотермического режима на протяжении нижнего бьефа.

Для выявления возможных количественных изменений водного и ледотермического режимов в нижнем бьефе гидроузла использо-

ван следующий прием, применяемый в практике водохозяйственно-го проектирования. Из длительного ряда наблюдений за стоком в створе гидроузла выбираются два периода – до строительства гидроузла, т.е. бытовой, и после строительства гидроузла, т.е. эксплуатационный, с близкими по величине параметрами годового стока. При этом годы первоначального наполнения водохранилища исключаются. Если оценка изменения режимов производится ниже каскадно расположенных водохранилищ, то эксплуатационный период соответствует совместной работе всего каскада водохранилищ.

Учитывая, что количественная оценка изменения водного и ледотермического режима производится путем сравнения осредненных данных по периодам, полученные выводы могут быть вполне достоверны. Данная проблема рассмотрена на примере Вилуйского водохранилища на р. Вилуй.

Вилуйская ГЭС I-II сооружена в 1347 км от устья р. Вилуй в районе с суровыми климатическими условиями, где среднемесячные температуры зимой опускаются ниже минус 30 °С, а летом поднимаются до плюс 25 °С. Водохранилище полезным объемом 22,4 км<sup>3</sup>, что в 1,1 раза больше объема годового стока в створе ГЭС, проводит многолетнее и внутригодовое регулирование стока, срезая расходы весенних месяцев (V – VI) и значительно увеличивая расходы в зимнюю межень (XII – III).

Расчетный бытовой период принят с 1948 по 1966 г. включительно, а эксплуатационный – с 1970 по 1987 г. Среднегодовые расходы воды в среднем за периоды составили соответственно 629 и 628 м<sup>3</sup>/с. В табл. 16.1 даны расходы воды в среднем по периодам в створе ГЭС.

Резкое увеличение зимних расходов воды (более чем в 100 раз) при положительной температуре сбрасываемой воды (около плюс 2 °С) вызывает формирование мощного теплого потока, повлекшего за собой изменения термического и ледового режима реки на большом удалении от ГЭС. При этом непосредственно у плотины ГЭС в нижнем бьефе сохраняется незамерзающий участок (полынья) длиной в среднем 50 – 60 км.

Изменения уровней и температуры воды, сроков замерзания и вскрытия, продолжительности ледостава и толщины льда прослежены на участке свыше 2000 км от ГЭС.

Таблица 16.1

расходы воды в створе ГЭС в среднем за бытовой и эксплуатационный периоды

		Расход воды, м <sup>3</sup> /с										
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
7,25	4,71	4,10	4,36	2020	3140	875	496	557	258	44,7	15,8	
594	577	505	412	320	862	1170	599	425	477	540	594	
587	572	501	408	-1700	-2280	295	103	-132	219	495	578	

Величина изменений среднемесячных уровней воды в эксплуатационный период по отношению к бытовому режиму в расчетных створах нижнего бьефа приведена в табл. 16.2. Эти изменения даны за период весеннего половодья (V – VI), когда наблюдается наибольшая срезка уровней в створах нижнего бьефа за счет наполнения водохранилища, и за холодный период (период зимней межени) с декабря по март, когда проходит максимум электропотребления, что вызывает резкое повышение расходов (уровней) воды, сбрасываемой в нижний бьеф.

Естественный режим стока любой реки имеет отпечаток определенной зарегулированности, оцениваемой коэффициентом  $\phi$ , численно равным отношению базовой площади кривой продолжительности среднемесячных расходов воды к площади за год. С помощью водохранилищ за счет перераспределения стока из половодья на межень степень зарегулированности, т.е.  $\phi$ , должна повышаться. Для оценки величины изменения  $\phi$  на протяжении нижнего бьефа Вилюйской ГЭС – I, II рассчитаны и построены совмещенные кривые продолжительности среднемесячных уровней воды, а не расходов воды, что вызвано отсутствием стоковых данных, до и после строительства водохранилища. Так как при этом оцениваются не абсолютные значения  $\phi$  в бытовых и эксплуатационных условиях, а только их приращения, данный прием вполне допустим. Выявленные приращения  $\phi$  приведены в табл. 16.2.

Минус показывает на срезку уровней, а плюс – на повышение уровней в эксплуатационный период.

Из таблицы видно, что среднемесячные уровни воды у Сюльдюкара снизились в среднем за период весеннего половодья (V–VI) до 250 см, или на 40% по отношению к бытовым (естественным), а в среднем за зимнюю межень увеличились почти в 5 раз. При этом коэффициент зарегулированности  $\phi$  повышается на 0,22. По мере удаления от створа Вилюйской ГЭС влияние водохранилища затухает, и у Верхне-Вилюйска срезка уровней в весеннее половодье составляет 74 см, или 13%. Уровни в зимнюю межень повышаются в 2 раза. С выходом на р. Лену влияние Вилюйского водохранилища на уровни воды практически не прослеживаются.

В результате уменьшения расходов воды летом и их резкого увеличения зимой изменяется температура воды, сроки замерзания и вскрытия. Эти изменения хорошо видны из табл. 16.3.

Из таблицы видно, что за счет перераспределения теплового потока р. Вилюй будет замерзать на 10 – 15 суток позже. Вскрытие реки будет наблюдаться примерно в те же сроки. Следовательно, период ледостава уменьшится в целом на 14 – 17 суток на участке до Сунтара, или на 7 – 8% по отношению к бытовым условиям. У Верхне-Вилюйска это увеличение периода ледостава составит всего 4%. На такой же процент увеличивается длительность ледостава в условиях эксплуатации Вилюйской ГЭС и на р. Лене.

Изменение толщины льда на рассматриваемом участке представлено в табл. 16.2.

Таблица 16.2

**Изменение среднемесячных уровней воды и коэффициентов  $\phi$  в расчетных створах нижнего бьефа после создания Вилюйского водохранилища**

Створ	Расстояние от ГЭС-I, -II, км	Изменение уровня воды, см (%) / период		Увеличение $\phi$ $\Delta\phi$ (%)
		весеннее половодье (V-VI)	зимняя межень (XII-III)	
р. Вилюй Сюльдюкар	194	-250 (40)	356 (456)	0,22 (34)
Вилючан	399	-152 (26)	283 (250)	0,16 (22)
Сунтар	603	-248 (43)	264 (360)	0,14 (21)
Верхне-Вилюйск	908	-74 (13)	178 (220)	0,15 (23)
р. Лена Жиганск	1789	-7 (1,7)	0	0,03 (4)
Кюсюр	2332	37 (4)	27 (9)	0,05 (8)

Таблица 16.3

**Изменения сроков замерзания, вскрытия и продолжительности ледостава на протяжении нижнего бьефа Вилюйской ГЭС-I, -II**

Створ	Расстояние от ГЭС-I, -II, км	Замерзание		Вскрытие		Сокращение периода ледостава	
		до ввода ГЭС	после ввода ГЭС	до ввода ГЭС	после ввода ГЭС	в днях	в %
р. Вилюй Сюльдюкар	194	16.X	24.X	15.V	9.V	14	6,6
Вилючан	399	16.X	30.X	16.V	14.V	16	7,5
Сунтар	603	16.X	29.X	17.V	13.V	17	8,0
Верхне-Вилюйск	908	17.X	22.X	18.V	14.V	9	4,2
р. Лена Жиганск	1789	31.X	1.XI	29.V	19.V	9	4,3
Кюсюр	2332	22.X	26.X	2.VI	25.V	7	3,1

Таблица 16.4

## Изменение толщины льда

Створ	Расстояние от ГЭС-I, -II, км	Толщина льда, см		Снижение толщины льда	
		до ввода ГЭС	после ввода ГЭС	см	%
р. Вилюй Сюльдюкар	194	82	72	10	12
Вилючан	399	92	84	8	9
Сунтар	603	68	53	15	22
Верхне-Вилюйск	908	94	78	16	17
р. Лена Жиганск	1789	116	115	1	0
Кюсюр	2332	130	116	14	10

Из таблицы видно, что толщина льда снижается на р. Вилюй до 20% по отношению к бытовым условиям.

Рассмотренные изменения уровня и ледотермического режимов р. Вилюй в условиях эксплуатации ГЭС-I,II позволяют сделать вывод, что влияние ГЭС на гидрологический режим реки распространяется на значительное расстояние. Повышение зимних уровней прослеживается практически до устья р. Вилюй.

Значительное нарушение ледового режима (сдвиг сроков замерзания и вскрытия) не распространяется дальше 600 км от ГЭС.

Анализ приведенных данных показывает, что Вилюйское водохранилище практически не оказывает влияние на гидрологический режим р. Лены.

### 16.2. Основные положения расчетов неустановившегося движения воды в нижнем бьефе при суточном регулировании мощности ГЭС

В современных условиях режим работы электростанций в суточном разрезе отличается крайней неравномерностью. Переменная нагрузка ГЭС влечет за собой соответствующие переменные расходы в ее нижнем бьефе, а следовательно, и появление неустановившегося движения воды.

Наиболее значительные изменения уровней в нижнем бьефе имеют место в створе ГЭС. Ниже по течению эти изменения постепенно затухают и на некотором удалении от ГЭС становятся мало-

заметными. Расстояние, на которое распространяется влияние неустановившегося режима при суточном регулировании, зависит от характера графика расходов и гидравлических особенностей русла: уклона, ширины, глубины, формы поперечных сечений.

Расчеты неустановившегося движения сводятся к определению изменения расхода и уровней в ряде створов по длине водотока и во времени, т.е. установлению двух функций:

$$Q = Q(S, t), Z = Z(S, t), \quad (16.1)$$

где  $S$  – расстояние от начального створа.

Система уравнений, описывающая неустановившееся медленно изменяющееся течение в не размываемом русле произвольной формы, была предложена Сен-Венаном в 1870 г. Эта система, состоящая из известных уравнений неразрывности потока и уравнения движения, является нелинейной и относится к гиперболическому типу. Для решения указанной системы уравнений обычно применяют численные методы решения, позволяющие широко использовать ЭВМ.

Расчет неустановившегося движения является довольно трудоемким, требует проведения изыскательских работ и водомерных наблюдений. Поэтому такой расчет выполняется для завершающих стадий проектирования. При иных условиях ограничиваются упрощенными ручными расчетами.

Для выполнения подробных гидравлических расчетов по нижним бьефам гидроузлов при суточном регулировании мощности ГЭС задаются следующие исходные данные: графики нагрузки в нормальном и аварийном режимах для летних и зимних условий (в расходах либо в мощностях) и расчетный напор; продольный профиль от створа гидроузла на участке нижнего бьефа длиной 150 – 200 км; поперечные профили русла реки (не менее чем в 15 – 20 створах нижнего бьефа), выполненные по промерам либо по лоцманской карте и карте масштаба 1:25 000; зависимости расходов от уровней воды в опорных створах нижнего бьефа; зимний режим нижнего бьефа (длина полыньи и значения зимних коэффициентов у плотины, на кромке льда и в зоне устойчивого ледостава). В качестве исходных гидравлических параметров используется модуль пропускной способности русла  $K = Q / \sqrt{i}$ , где  $i$  – уклон водной по-

верхности на рассматриваемом участке при расходе  $Q$ . При наличии кривых связи расходов и уровней воды  $Q = f(Z)$  координаты кривой  $K = f(Z)$  определяются из зависимости

$$K / \Delta S = Q / \sqrt{Z_{\text{н}} - Z_{\text{к}}}$$

( $\Delta S$  – длина участка;  $Z_{\text{н}}$  и  $Z_{\text{к}}$  – уровни воды в начале и конце участка при расходе  $Q_i$ , а  $Z = (Z_{\text{н}} + Z_{\text{к}}) / 2$ . В некоторых случаях  $K$  можно определять по формуле Шези-Маннинга  $K = FC\sqrt{R}$ , где  $F$  – площадь живого сечения;  $C$  – коэффициент Шези, определяемый по формуле Маннинга, а  $R$  – гидравлический радиус.

Средний на участке модуль  $K$  вычисляется путем осреднения либо характеристик  $F$ ,  $C$ ,  $R$ , либо самих значений  $K$  в верхнем и нижнем створах расчетного участка. Для определения изменений объема воды в русле участков используются кривые зависимости объема  $V$  на участке от уровня воды в его середине  $Z$ . Эти кривые строятся по поперечным профилям русла или на основании планиметрирования горизонталей русловой съемки.

При выполнении расчетов неустановившегося движения воды в нижнем бьефе ГЭС при суточном регулировании ее мощности в качестве верхнего граничного условия в створе ГЭС принимается график электрической нагрузки, пересчитываемый в расходы воды по формуле:

$$Q_i = N_i / [K_N (H_{\text{бр } i} - \Delta h)], \quad (16.2)$$

где  $N_i$  – мощность ГЭС в момент времени  $t_i$ ;  $H_{\text{бр}}$  – напор брутто на ГЭС в тот же момент, определяемый как разность уровней верхнего и нижнего бьефов (вычисляется в процессе расчета);  $\Delta h$  – потери напора, принимаемые, как правило, постоянными;  $K_N = 8,5 \dots 8,7$ .

В качестве нижнего граничного условия принимается кривая связи расходов и уровней воды в конце рассматриваемого участка, где влияние суточного регулирования мощности ГЭС практически не сказывается.

Результаты расчетов оформляются в виде табличных и графических приложений. Так, в табл. 16.5 и на рис. 16.1 приведены результаты расчетов применительно к одной из сибирских ГЭС. Они соответствуют летним суткам.

Таблица 16.5

Результаты расчетов суточного регулирования мощности ГЭС Летние сутки:  
среднесуточная мощность ГЭС 863 МВт, среднесуточный расход ГЭС 880 м<sup>3</sup>/с

№ створа	Расстояние от ГЭС, км	Уровень воды, м			Расход воды, м <sup>3</sup> /с	
		максимальный	минимальный	амплитуда	максимальный	минимальный
1	0	505,0	500,2	4,8	2060	220
2	31	481,2	479,3	1,9	1690	470
3	76	464,1	462,8	1,3	1340	590
4	167	394,2	393,2	1,0	1200	650
5	246	329,5	328,8	0,7	1150	650

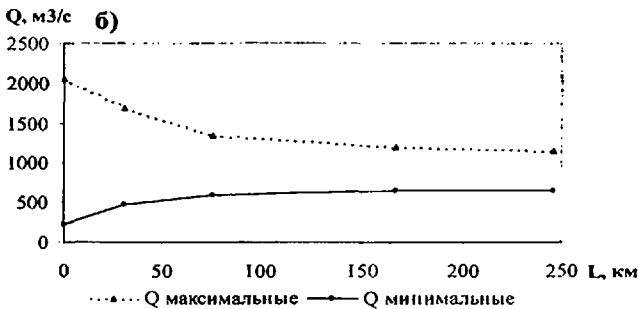
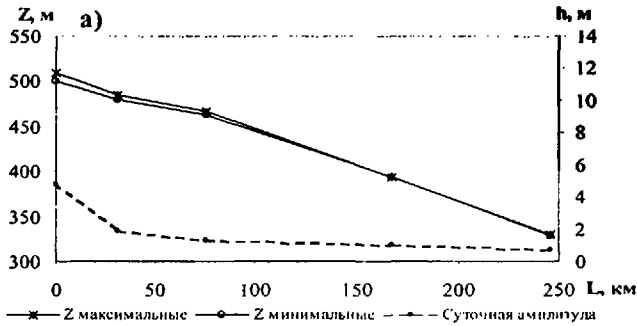


Рис. 16.1. Уровни (а) и расходы (б) воды в нижнем бьефе ГЭС при суточном регулировании ее мощности.

Анализ таблицы и графика показывает что, определение уровней нижнего бьефа ( $Z_{н.б}$ ) при расчете напоров ГЭС ( $H$ ) и в после-

дующем мощностей ГЭС( $N$ ) по среднеинтервальным расходам, сбрасываемым в нижний бьеф, приводит к занижению их, а следовательно, к завышению  $H$  и  $N$ .

Для учета суточных колебаний уровней в нижнем бьефе при проведении водноэнергетических расчетов рекомендовано много способов [8]. Наиболее простой и доступный из них сводится к нахождению  $Z_{н.б}$  по кривой  $Q = f(Z_{н.б})$  соответствующих расходам воды в нижнем бьефе не ниже средневзвешенного расхода  $Q_{ср. взв}$ . При этом  $Q_{ср. взв} \approx (0,7 - 0,8) Q_{макс}$ , где  $Q_{макс}$  – максимальный расход ГЭС при работе ее в пике графика нагрузки.

Выявленные суточные колебания расходов и уровней в нижнем бьефе ГЭС отрицательно влияют на работу водного транспорта. По существующим нормативам габариты судового хода определяются при среднесуточных расходах (уровнях) воды, поэтому всякое их снижение требует дополнительных мероприятий по их обеспечению. Чаще всего – это проведение землечерпательных работ в зоне суточного регулирования мощности ГЭС. Реже – строительство буферных водохранилищ, выравнивающих суточные колебания вышерасположенного гидроузла. Таким водохранилищем является Майнское водохранилище, расположенное ниже водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС.

Резкие суточные колебания расходов (уровней) воды на протяжении нижнего бьефа в зимний период создают опасность нормальной работе русловых водозаборов и безопасности отстоя флота в затонах. Из практики эксплуатации сибирских гидроузлов следует, что для нормальной работы водозаборов и безопасного отстоя флота в затонах суточная амплитуда колебаний уровней воды не должна превышать в месте их расположения 1,25 м. Такое ограничение амплитуды колебаний уровней воды сказывается на снижении мощности участия ГЭС в покрытии графика нагрузки.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Назовите способы оценки изменения водного и ледотермического режимов в нижнем бьефе гидроузла.
2. С какой целью проводится оценка изменения естественного режима водотока под воздействием регулирования стока водохранилищем?
3. Каково влияние этих изменений на хозяйство в нижних бьефах ГЭС?
4. Как в общих чертах, проводятся расчеты неустановившегося режима в нижних бьефах ГЭС при суточном регулировании их мощности?

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А.* Водохранилища. – М.: Мысль, 1987. – 325 с.
2. *Авакян А.Б., Широков В.М.* Рациональное использование и охрана водных ресурсов. – Екатеринбург: Виктор, 1994. – 319 с.
3. *Авакян А.Б., Залетаев В.С., Новикова Н.Л., Митина И.Н.* О проблемах экологического прогнозирования при зарегулировании стока рек // *Водные ресурсы*, 1999, Т. 26, № 2, с. 133–147.
4. *Авакян А.Б.* Водохранилища и окружающая среда // *Водные проблемы на рубеже веков*. – М.: Наука, 1999, с. 217–227.
5. *Авакян А. Б.* О воде с тревогой и надеждой. – Екатеринбург: РосНИИВХ, 1999. – 173 с.
6. *Александровский А.Ю., Силаев Б.Ю., Черненко Г.Ф.* Оптимизация диспетчерских графиков работы каскада ГЭС // *Труды конференции «Современные проблемы стохастической гидрологии»*. – М.: ИВП РАН, 22–25 января 2001, с. 102–106.
7. *Арсеньев Г.С.* Практикум по водному хозяйству и водохозяйственным расчетам. – Л.: Изд. ЛГМИ, 1989. – 195 с.
8. *Арсеньев Г.С., Иваненко А.Г.* Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеонздат, 1993. – 272 с.
9. *Арсеньев Г.С.* Уточнение гидроэнергоресурсов Ленинградского экономического региона // *Труды РГГМУ*, 1999, Вып. 121, с. 13–20.
10. *Арсеньев Г. С.* Водохранилища Северо-Запада: особенности, увеличение зарегулированности стока рек // *Труды РГГМУ*, 1999, Вып. 121, с. 64–67.
11. *Арсеньев Г.С.* Эколого-гидрологические проблемы рационального использования водных ресурсов // *Труды РГГМУ*, 2000, Вып. 122, с. 43–48.
12. *Арсеньев Г.С.* Управление водными ресурсами: реальность и проблемы // *Труды конференции «Современные проблемы стохастической гидрологии»*. – М.: ИВП РАН, 22–25 января 2001, с. 106–110.
13. *Арсеньев Г.С.* Основы управления водными ресурсами водохранилищ. – СПб.: Изд. РГГМУ, 2003. – 78 с.
14. *Арсеньев Г.С.* Гидрологические и социальные проблемы пропуска расчетного половодья через каскад гидроузлов. Тезисы – с. 143. Доклад D4 на CD-ROM – с. 279 // *Международного симпозиума «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений»*. – СПб, 2002.
15. *Асариш А.Е., Бестужева К.Н.* Колебание стока рек и энергоотдачи ГЭС России // *Гидротехническое строительство*. – 1997. № 2, с. 1–6.
16. *Асариш А.Е., Иваненко С.П.* Двухступенное управление режимом работы противопаводковых водохранилищ. Тезисы, с. 147. Доклад D4 на CD-ROM – с. 283 // *Международного симпозиума «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений»*. – СПб, 2002.
17. *Бакалов В.Д., Громан Д.С., Залиханов М.Г., Панов В.Д.* Управление режимом горных ледников и стоком рек. – Л.: Гидрометеонздат, 1990. – 239 с.

18. Баранова Е. А., Малик Л. К. Гидроэнергетика России в экологическом измерении // Энергия: экономика, техника, экология. – 1995, № 9, с. 27–30.
19. Васильев Ю.С., Хрисанов Н.И. Экологические аспекты гидроэнергетики. – Л.: ДГУ, 1984. – 248 с.
20. Васильев Ю.С., Елистратов В.В., Масликов В.И., Фьонг Ф.В. Экономическая безопасность при управлении паводками речного бассейна. Тезисы, с. 149. Доклад D5 на CD-ROM, с. 283 // Международного симпозиума «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений». – СПб, 2002.
21. Великанов А. Л. Регулирование стока как задача теории управления водными ресурсами // Водные ресурсы, 1999, т. 26, № 5, с. 583–593.
22. Владимиров А. М., Орлов В. Г., Сакович В. М. Экологические аспекты использования и охраны водных ресурсов (вод суши), СПб: РГГМУ, 1997. – 126 с.
23. Водный кодекс Российской Федерации. М., 1999. – 88 с.
24. Вода России. Водно-ресурсный потенциал / Под ред. А.М. Черняева: ФГУП РосНИИВХ. – Екатеринбург: Изд. «Аква-Пресс», 2000. – 420 с. + 16 с. ил. вкл.
25. Вода России. Водохранилища: ФГУП РосНИИВХ. – Екатеринбург: Издательство «Аква-Пресс»: 2001. – 700 с.
26. Воды России, 1995 (состояние, использование, охрана) / Рос НИИВХ. – Екатеринбург: Изд. «Виктор», 1996. – 103 с.
27. Вуглицкий В.С. Водные ресурсы и водный баланс водохранилищ СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 224 с.
28. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНИП 33-01-2003. Госстрой России. М., 2004. – 24 с.
29. Георгиевский В.Ю., Шикломанов И.А. и др. Оценка влияния возможных изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек территории бывшего СССР / Метеорология и гидрология. – 1996. № 11, с. 89–99.
30. Демин А.П. Тенденции использования и охраны водных ресурсов в России // Водные ресурсы. – 2000. – Т. 27. № 6, с. 735–754.
31. Дружинин В.С., Сикап А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. СПб.: Изд. РГГМУ, 2001. – 169 с.
32. Дубинина В.Г. Методические основы экологического нормирования безвозвратного изъятия речного стока и установившегося экологического стока (попуска). М.: «Экономика и информатика», 2001. – 120 с.
33. Использование водной энергии: Учебник для вузов / Под ред. Ю.С. Васильева. 4-е изд., перераб и доп. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 608 с.
34. Лобанов В.А., Рождественский А.В. Оценка безопасности действующих гидротехнических сооружений на основе уточнения расчетных максимальных расходов воды. Тезисы, с. 65. Доклад В2 на CD-ROM, с. 207 // Международного симпозиума «Гидравлические и гидрологические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений». – СПб, 2002.
35. Львов А.В., Федоров М.П., Шульман С.Г. Надежность и экологическая безопасность гидроэнергетических установок. СПб.: Изд. СПбГУ, 1999. – 85 с.
36. Малая гидроэнергетика / А.П. Михайлов, Б.Н. Фельдман и др. / Под ред. Л.П. Михайлова. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 180 с.

37. Методические указания о составе, содержании, порядке разработки, согласования, утверждения, уточнения схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов. ИВН 33-5.107-87. – М.: Минводхоз СССР, 1987. – 67 с.
38. Методические указания по разработке нормативов предельно-допустимых вредных воздействий на поверхностные водные объекты. М.: 1999. – 36 с.
39. Методические указания по составлению Правил использования водных ресурсов водохранилищ гидроузлов электростанций / А.Е. Асарин, К.Н. Бестужева, А.М. Резниковский и др. / Под ред. В.С. Серкова. М., 2000. – 56 с.
40. *Нежиховский Р.А.* Гидролого-экологические основы водного хозяйства. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 230 с.
41. *Носаль А.П., Черняев А.М.* Нормирование антропогенной нагрузки на водные объекты в свете концепции устойчивого развития // Инженерная экология. – 2001, № 5. – С. 2–14.
42. О повышении экологической чистоты ГЭС. Ю.С. Васильев, В.В. Елистратов, В.И. Масляков // Безопас. энерг. сооруж. – 2000, № 6, с. 37–44.
43. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СНиП 33-101-2004. Издание официальное. Госстрой России. М., 2004. – 72 с.
44. *Раткович Д.Я.* Гидрологические основы водообеспечения. – М., 1993. – 428 с.
45. *Раткович Д.Я., Болгов М.В.* Стохастические модели колебаний составляющих водного баланса речного бассейна. М.: ИВП РАН, 1997. – 260 с.
46. *Рождественский А.В. и др.* Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 00-000. – СПб, 2002.
47. Типовые правила эксплуатации водохранилищ емкостью 10 млн. м<sup>3</sup> и более. РД 33-32.08-87. Минводхоз СССР. М., 1987. – 153 с.
48. Управление водными ресурсами в бассейне реки / Под науч. ред. А.Н. Черняева: РосНИИВХ. – Екатеринбург: Изд-во «Виктор», 1993. – 120 с.
49. *Фацевский Б.В.* Основы экологической гидрологии. – Минск, 1996. – 240 с.
50. *Хрисанов Н.И., Арефьев Н.В.* Экологическое обоснование гидроэнергетического строительства: Учеб. пособие / СПб Гос. техн. университет, СПб. 1992. – 168 с.
51. *Шахов И.С.* Водные ресурсы и их рациональное использование. – Екатеринбург: изд-во «Аква-Пресс», 2000. – 289 с.
52. *Шахов И.С., Черняк В.Я.* Экологические ограничения использования стока рек // Мелиорация и водное хозяйство, 2000. – № 2. – С. 37–38.
53. *Щикломанов И.А.* Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 334 с.
54. *Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. – М.: Геос, 1998. – 277 с.
55. Экологические аспекты возобновляемых источников энергии / В.И. Виссарионов, Л.А. Зитов. – М.: Изд-во МЭИ, 1996. – 156 с.

Учебное издание

Герман Семенович Арсеньев

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ:  
ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Учебник

*Редактор* Л.В. Ковель

ЛР № 020309 от 30.12.96.

---

Подписано в печать 31.08.05. Формат 60x90 1/16. Гарнитура Times New Roman.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 14,5. Тираж 400 экз. Заказ № 05  
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.  
ЗАО НПЦ «Система», 195112, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 80/2.

---

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие .....	3
Введение .....	6
Раздел 1. ВОДНЫЕ И ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ .....	12
Глава 1. Водные ресурсы .....	12
1.1. Возобновляемые водные ресурсы и их распределение по территории .....	12
1.2. Комплексное использование водных ресурсов в связь их с природными и экономическими условиями .....	15
Глава 2. Водноэнергетические ресурсы .....	18
2.1. Методы определения водноэнергетических ресурсов и трудности их реализации .....	18
2.2. Теоретический, технический, экономический водноэнергетический потенциал рек .....	20
2.3. Нетрадиционные возобновляемые энергоресурсы и сложность их использования .....	24
Раздел 2. ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ .....	27
Глава 3. Гидрологическая информация и способы ее использования .....	27
3.1. Общие положения .....	27
3.2. Состав гидрологических данных для водохозяйственного проектирования .....	27
3.3. Особенности гидрологического обоснования озерных водохранилищ .....	36
3.4. Методы проведения расчетов регулирования стока водохранилищами по гидрологическим рядам .....	37
Раздел 3. УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ .....	40
Глава 4. Нормативные документы по управлению водными ресурсами России .....	40
Глава 5. Водохозяйственный баланс как основа необходимости управления водными ресурсами .....	43
5.1. Методика составления водохозяйственных балансов .....	43
5.2. Современная методология установления экологических (природоохранных) попусков .....	47
5.3. Оценка воздействия экологических попусков из водохранилищ на водо- и энергоотдачу комплексных гидроузлов .....	51
Глава 6. Водоохранилища и их хозяйственное значение .....	59
6.1. Основные предпосылки создания водохранилищ .....	59
6.2. Определение и типы водохранилищ .....	60
6.3. Виды регулирования стока водохранилищами и их основные характеристики .....	67
6.4. Влияние водохранилищ на гидрологический режим водотоков и притоку прилегающих территорий .....	75
6.5. Основные направления по снижению площадей затопляемых земель при создании водохранилищ .....	80
6.6. Другие мероприятия по увеличению располагаемых к использованию водных ресурсов .....	86

Глава 7. Расчетная обеспеченность водопользования при управлении водными ресурсами .....	90
Глава 8. Расчеты сезонного регулирования стока водохранилищами .....	94
8.1. Исходные данные для проведения расчетов регулирования стока .....	94
8.2. Использование интегральных кривых для расчета сезонного регулирования стока .....	103
8.3. Обобщенные методы расчета сезонного регулирования стока .....	107
8.4. Расчеты сезонного регулирования стока балансовым табличным способом .....	111
Глава 9. Расчеты многолетнего регулирования стока водохранилищами .....	116
9.1. Основные положения .....	116
9.2. Методы определения составляющих полезного объема водохранилища многолетнего регулирования стока .....	117
9.3. Расчеты многолетнего регулирования стока балансовым табличным способом по календарным гидрологическим рядам .....	126
Глава 10. Расчет и построение обобщенной водохозяйственной характеристики водохранилища .....	130
Глава 11. Водноэнергетические расчеты .....	134
11.1. Определение и задачи .....	134
11.2. Роль гидроэлектростанций в энергосистемах и их участие в покрытии графика нагрузки .....	137
11.3. Характеристика гидросилового оборудования ГЭС и понятие установленной мощности .....	142
11.4. Водноэнергетические расчеты по календарным стоковым рядам .....	143
11.5. Особенности обоснования параметров малых ГЭС и ГЭС с нерегулируемыми водохранилищами .....	148
Глава 12. Специальные водохозяйственные и водноэнергетические расчеты .....	151
12.1. Первоначальное наполнение водохранилища и режим работы ГЭС .....	151
12.2. Отдача из водохранилища за пределами расчетной обеспеченности .....	154
Глава 13. Каскадное регулирование стока .....	156
13.1. Общие положения .....	156
13.2. Компенсирующее каскадное регулирование стока .....	158
13.3. Методика оценки водохозяйственного и водноэнергетического эффекта развития каскада водохранилищ и энергетических объединений .....	160
Глава 14. Разработка правил управления водными ресурсами водохранилищ с целью повышения эффективности их использования .....	170
14.1. Общие положения .....	170
14.2. Интересы водопользователей и их учет в «Правилах управления водными ресурсами водохранилищ» .....	175
14.3. Исходные данные для разработки «Правил управления водными ресурсами водохранилищ» .....	178
14.4. Разработка диспетчерских графиков управления работой некоторых водохранилищ сибирских гидроэлектростанций .....	179
14.5. Основные приемы управления работой каскадов водохранилищ ГЭС .....	189

Глава 15. Расчет пропуска паводкой и паводков через гидротехнические сооружения . . . . .	192
15.1. Задачи и средства регулирования стока паводкой и паводков . . . . .	192
15.2. Расчеты пропуска стока паводкой и паводков через гидротехнические сооружения . . . . .	193
15.3. Основные положения выбора противопаводкового (резервного) объема водохранилищ . . . . .	205
15.4. Регулирование паводков распределенной системой водохранилищ с учетом экологических факторов . . . . .	208
Глава 16. Гидравлические расчеты при водохозяйственном проектировании . . . . .	212
16.1. Оценка влияния водохранилища на гидрологический режим в нижнем бьефе гидроузла . . . . .	212
16.2. Основные положения расчетов неустановившегося движения воды в нижнем бьефе при суточном регулировании мощности ГЭС . . . . .	217
Литература . . . . .	222