

Г. С. Арсеньев
А. Г. Иваненко

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Рекомендовано Комитетом по высшей школе
Миннауки России в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Гидрометеорология»
и специальности «Гидрология суши»



Санкт-Петербург Гидрометеоиздат 1993

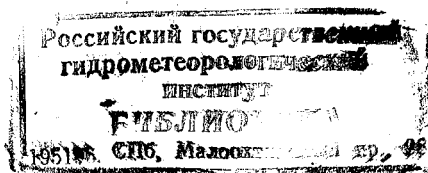
УДК 556.18 + 556.048

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. М. П. Федоров, д-р техн. наук, проф. Б. А. Соколов (Санкт-Петербургский технический университет); д-р техн. наук А. Е. Асарин (Всероссийский проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт им. С. Я. Жука)

Даны современные определения и задачи водного хозяйства. Изложены требования различных отраслей хозяйства к водным ресурсам и их качеству. Подробно рассмотрены состав исходной информации для водохозяйственного проектирования и методы водохозяйственных и водноэнергетических расчетов. Особое внимание уделено методологии расчетов регулирования стока водохранилищами. Освещены вопросы оптимизации режимов эксплуатации водохозяйственных систем.

Для студентов гидрометеорологических институтов и университетов по специальности «гидрология суши». Может быть полезен для специалистов водного хозяйства и гидроэнергетиков.

In the textbook «The water economy and water economics calculations» by G. S. Arsenjev and A. G. Ivanenko the modern definitions and the water economy topics are presented. Economy various brunches requirments to water resources and their quality are described. The content of the initial information intended for water economics designing and water economics and water energetic calculating technignes is discussed at length. Some special attantion is given to the calculation methods of the flow regulation by water storage reservoirs. The topics of water economy systems exploatation regime optimization are described. The book is intended for university students studying hydrology. It can be of some use for those working in the fields of the water economy and hydroenergetics.



А 3800000000-021 15-93
069(02)-93

© Арсеньев Г. С.,
Иваненко А. Г., 1993 г.

ISBN 5-286-00797-X

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты» относится к специальным дисциплинам гидрологического профиля, завершающим подготовку инженеров-гидрологов. Она имеет четкую практическую направленность, знакомит студентов со способами использования водных ресурсов и управления ими при водохозяйственном и гидроэнергетическом проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений и водных объектов.

В целом дисциплина «Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты» является составной частью инженерной гидрологии и опирается на такие дисциплины, как гидрологические расчеты, общая гидрология, гидрометрия и водно-технические изыскания, гидротехника и мелиорация, общая и речная гидравлика, мелиоративная гидрология, инженерная гидрогеология.

В результате изучения дисциплины «Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты» будущий специалист-гидролог должен знать приемы решения вопросов эффективного использования водных ресурсов различными отраслями хозяйства; современные методы инженерного расчета регулирования стока для удовлетворения их требований, а также методы водноэнергетических расчетов; уметь решать водохозяйственные и водноэнергетические задачи, а именно: определять гидроэнергетические ресурсы водотока, разрабатывать водохозяйственные балансы для бассейнов рек, проводить расчеты регулирования стока водохранилищами с целью определения их основных параметров, обосновывать параметры гидроэлектростанций, разрабатывать диспетчерские графики управления работой водохранилищ, проводить необходимые гидравлические расчеты при водохозяйственном и водноэнергетическом проектировании и другие.

Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты отнесены сегодня к отрасли инженерного дела, к одной из научных дисциплин.

При изложении материала авторы стремились сохранить известную историческую преемственность в учебной литературе по этой дисциплине, учтя то лучшее, что было в учебнике В. А. Бахтиярова и учебном пособии С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

Кроме того, учтен большой опыт таких проектных и научных организаций, как Гидропроект, Энергосетьпроект, Гипроводхоз, а также Московского энергетического института и Санкт-Петербургского технического университета.

Содержание учебника разбито на две части. Первая часть включает в себя основные сведения о водном хозяйстве и вопросы планирования использования водных ресурсов. В отдельной главе даны типы и назначения водохранилищ, виды осуществляемого ими регулирования стока, показано влияние водохранилищ на окружающую среду. Знакомство с источниками воздействия на окружающую среду и мерами по ее охране явится первым шагом в направлении экологического образования современного инженера-гидролога. Вторая часть освещает 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 работой водохранилищ данный вопрос выделен в самостоятельную главу после разбора методики и практических приемов регулирования стока. И в конце второй части даются основы планирования режимов эксплуатации водохозяйственных систем. Выделение этих частей продиктовано сложностью проблемы, а также экономической и социальной необходимостью повышения эффективности их работы. В главах, в которых приводятся приемы расчетов, даны формы таблиц для ручного и машинного счета, используемые в практике водохозяйственного и гидроэнергетического проектирования. Эти таблицы следует рассматривать как один из вариантов реализации тех или иных расчетов регулирования стока. При решении комплексных задач количество граф в них может быть дополнено.

Настоящий учебник отражает не только опыт преподавания этого курса в гидрометеорологических институтах, но и многолетний опыт практической деятельности одного из авторов, Г. С. Арсеньева, в Ленгидропроекте.

Для лучшего освоения теоретического материала в учебнике после каждой главы помещены контрольные вопросы, охватывающие основные положения изложенного в главе материала и временно помогающие его систематизировать.

Закрепление теоретического материала учебника в процессе обучения должно осуществляться при выполнении студентами

лабораторных заданий с использованием практикума по данной дисциплине.

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

Предисловие, введение, главы 3, 6, с 8 по 16 включительно написаны канд. техн. наук, доц. Г. С. Арсеньевым, главы 5, 17 — доц. геогр. наук, проф. А. Г. Иваненко, остальные главы учебника написаны авторами совместно.

При подготовке рукописи к печати неоценимую помощь авторам оказали рецензенты — д-ра техн. наук А. Е. Асарин и А. Л. Федоров, Б. А. Соколов, а также коллектив кафедры возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики Санкт-Петербургского технического университета, руководимой чл.-корр. РАН Ю. С. Васильевым, за что авторы выражают им глубокую благодарность.

ВВЕДЕНИЕ

Водное хозяйство в настоящее время — это совокупность естественных водоисточников и сложных систем инженерных устройств и сооружений, предназначенных для гарантированного обеспечения хозяйства водой в соответствии с требованиями водопользователей к ее качеству, местам и времени водоподачи, для отвода отработанных (возвратных) вод, а также для предотвращения или смягчения вредных воздействий поверхностного стока на природные комплексы.

Вода — важнейший и неотъемлемый фактор, определяющий жизнедеятельность общества и развитие производительных сил. Она не имеет заменителей. От уровня водообеспечения в значительной мере зависит развитие экономического потенциала общества. В свою очередь, уровень обеспечения водой определяется водными ресурсами, которыми располагает человек в том или ином географическом районе. Согласно данным Государственного гидрологического института, особенно интенсивный рост водопользования имел место в период с 1950 по 1980 г. За этот период забор воды в целом по территории бывшего СССР увеличился в 3,6 раза и составил 340 км³/год. При этом особенно быстрыми темпами он увеличивался на нужды промышленности и теплоэнергетики.

По мере роста потребления воды все большие масштабы приобретает несоответствие между свойственными большинству рек резкими сезонными и многолетними колебаниями стока и режимом ее потребления. Эффективным средством перераспределения речного стока во времени и приведения его режима в соответствие с режимом водопользования пока являются водохранилища. На территории бывшего СССР уже насчитывается свыше 2500 искусственных водохранилищ (18 % мирового их числа) объемом 1 млн м³ каждое. Их суммарный полный объем составляет около 1200 км³, а полезный — около 500 км³; площадь водного зеркала — 64 тыс. км², а включая подпорные озера — 117 тыс. км².

Проводимое водохранилищами глубокое регулирование речного стока способствует значительному увеличению (до 40 %) наличных водных ресурсов в период межени. При этом повышается

ровень водообеспеченности отраслей хозяйства, а также сглаживаются противоречия в режимных требованиях к воде отдельных отраслей.

Проектирование режима работы водохранилища представляет собой решение круга вопросов водохозяйственными расчетами, основными задачами которых служат разработка методов и обоснование их основных параметров, установление возможного водохозяйственного эффекта от намечаемых мероприятий по использованию водных ресурсов, а также составление правил управления работой водохранилищ.

Наряду с водными ресурсами, республики, входившие в бывший Союз, обладают значительными гидроэнергоресурсами, по запасам которых они занимают первое место в мире. Однако по освоению экономического гидроэнергopotенциала, оцениваемого в 1100 млрд. кВт·ч среднегодовой выработки электроэнергии, их пережидает большинство промышленно развитых стран. Так, если в Канаде освоено около 50 % экономически эффективного потенциала, в Японии — 62 %, Италии — 74 %, Франции — более 90 %, США — 44 %, то в среднем по республикам эта цифра составляет около 20 % (в европейской части — 39 %, Сибири и Средней Азии — 20, на Дальнем Востоке — менее 5 %). На начало 1992 г. суммарная установленная мощность ГЭС была равна 63 млн кВт, производство электроэнергии на них превысило 230 млрд Вт·ч, что в энергобалансе республик составило соответственно около 20 и 13 %.

К основным факторам, сдерживающим развитие гидроэнергетики, 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 сооружением дорогостоящего сложного подпорного сооружения и подготовкой зоны будущего водохранилища.

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 возможности, следующие мероприятия: заблаговременная широкая информированность и информированность населения о строительстве пред-

полагаемого 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 энергетического хозяйства. Реализация указанных мероприятий будет способствовать выбору таких объектов в перспективном энергетическом строительстве, которые будут гарантировать получение наибольшего суммарного хозяйственного эффекта при минимуме отчуждений земель и нарушений в экологической обстановке.

Раздел I

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Глава 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

1.1. Определение и задачи водного хозяйства

Водное хозяйство — отрасль хозяйства, занимающаяся изучением, учетом, использованием и регулированием водных ресурсов, охраной вод от загрязнения и истощения, транспортировкой их к месту назначения (использования).

Повсеместная потребность человека в воде реализуется путем создания различного рода инженерных сооружений — систем коммунального и промышленного водоснабжения, водохранилищ для регулирования речного стока и дамб для защиты от наводнений, прокладки искусственных водных путей и улучшения условий судоходства на реках, обеспечения надлежащих условий для рыбоводства. Все это определяет широкий круг задач, решаемых водным хозяйством в целях удовлетворения запросов общественного производства и населения в достаточном количестве воды требуемого качества.

В первую очередь водное хозяйство решает задачу организации питьевого и бытового водоснабжения, которое осуществляется в основном за счет подземных вод.

Подземные воды представляют собой наиболее ценный вид ресурсов, поскольку они являются наиболее надежным источником питьевой воды и имеют более высокое качество по сравнению с поверхностными водами.

В ряде регионов подземных вод не хватает для полного покрытия потребностей в питьевой воде. В этом случае практикуется совместное использование их с поверхностными водами. Водоснабжение же промышленных и транспортных предприятий, а также для сельскохозяйственных и других нужд осуществляется преимущественно за счет поверхностных вод. Вместе с тем, имеются и резервы более интенсивного использования подземных вод, в том числе и в сельскохозяйственном орошении при более широкой организации мероприятий по накоплению части поверхностного стока в подземных емкостях. Именно этот вид управления ресурсами подземных вод позволил, например, в США значительную долю пресных подземных вод использовать в сельском хозяйстве.

Для надежного обеспечения водой отраслей хозяйства осуществляется регулирование стока — перераспределение во времени

объема стока в соответствии с требованиями водопользования. Это достигается путем временного задержания воды в водохранилищах в периоды избытка естественного притока над потреблением и расходования накопленных запасов в периоды, когда потребление превышает естественный приток. В результате регулирования речного стока водохранилищами можно наиболее полно использовать воды реки для отраслей хозяйства. При этом решая основную задачу — повышение низкого стока в межень и уменьшение высоких расходов паводков и половодий, водохранилища улучшают условия водного транспорта более крупного тоннажа, способствуют рыборазведению и рыбодобыче, благоустройству населенных мест и мест отдыха. Благодаря подъему уровня в водохранилище обеспечивается возможность самотечной подачи воды на орошение и обводнение, значительно уменьшается расходование энергии на подъем воды для водоснабжения промышленных предприятий и населенных пунктов.

Наряду с большой пользой водохранилища приносят определенный вред, поскольку с ними неизбежно связаны затопления и подтопления значительных площадей использовавшихся ранее в сельском хозяйстве земель, пашен и заливных лугов; затопляются лесные угодья, населенные пункты, промышленные, транспортные и другие сооружения. Бичом для окружающей водохранилище освоенной территории являются подтопление и заболачивание земель, делающие их непригодными для проживания населения у берегов водохранилища, а ухудшение качества их в связи с развитием сине-зеленых водорослей дополняет перечень отрицательных влияний водохранилищ.

Однако, поскольку водохранилища являются одним из основных средств увеличения доступных к использованию водных ресурсов, строительство их в обозримой перспективе будет продолжаться.

Водное хозяйство призвано решать много задач по борьбе с вредным воздействием вод: защита от наводнений, селевых потоков и снежных лавин, осушение переувлажненных территорий, борьба с водной эрозией, оползнями, заболачиванием и засолением почв и др.

Особенно большие наводнения и вызываемый ими ущерб имеют место в областях с муссонным климатом (в бассейнах рек Амура, Зеи, Буреи и др.), где летние и осенние паводки связаны с обильными и продолжительными дождями. Здесь обширные затопления при наводнениях носят характер стихийных бедствий. Исключительно высоким и разрушительным отмечалось наводнение на р. Зее в 1928 г. От этого наводнения пострадали города, расположенные на Амуре, Благовещенск и Хабаровск. Сильные наводнения здесь наблюдались также в 1923, 1938, 1953 и 1956 гг. В последующее десятилетие частота высоких паводков в бассейне Амура, формирующих опасные наводнения, увеличилась. Так, в 1984 г. от обильных дождей на реках Аргунь, Онон и Ага сформировались паводки с расходами, близкими или превышающими

наивысшие из случившихся за многолетний период наблюдений. В следующем 1985 г. на реках Онон, Ингода и в верховьях р. Шилки также сформировались высокие паводки, которые принесли значительный ущерб народному хозяйству. Были затоплены пойменные сельхозугодья, животноводческие фермы, повреждены или разрушены автодорожные мосты, затоплены расположенные в поймах рек населенные пункты. Влиянию тайфунов, приносящих обильные осадки, подвержены и другие территории обширного региона Дальнего Востока.

В настоящее время борьба с паводками осуществляется путем строительства гидроузлов с аккумулярующими водохранилищами, обвалования приречных территорий, разработки и реализации научно обоснованных систем ведения хозяйства и в первую очередь сельского хозяйства в долинах рек и на их водосборах.

Для предотвращения селей и защиты от них применялся комплекс мероприятий: прекращены вырубki лесов и кустарников, расширены площади их насаждений; травосеяние; террасирование; устройство подпорных стенок, а в руслах рек — запруд, плотин, ловушек-фильтров, селеуловителей и т. д. Примером активной и успешной защиты населенных пунктов от селей может служить большой комплекс мер по защите от селей г. Алма-Аты.

Большое внимание уделяется разработке и реализации методов борьбы с другими вредными воздействиями вод — разрушением берегов рек, водохранилищ и морей, водной эрозией на склонах и речных долинах. Перечисленные выше сведения о вредном воздействии вод дополняются многочисленными факторами антропогенного воздействия на воды негативного характера и требуют своего решения. Все они объединяются термином *водные проблемы* и кратко описаны в п. 1.3.

Ни одна из задач водного хозяйства не может быть решена без тщательного изучения имеющихся водных ресурсов региона, учета используемых в отраслях хозяйства вод и их охраны от загрязнений. Эти вопросы, равно как и планирование водохозяйственных и водоохраных мероприятий, предоставление водных объектов в использование и их изъятие из использования регламентируется водным законодательством. Приведенные выше сведения показывают широкий круг задач, решаемых водным хозяйством. Наиболее важные из них следующие:

- изучение, учет и охрана водных ресурсов от истощения и загрязнения;
- повышение стока маловодных периодов в целях удовлетворения потребностей населения и различных отраслей хозяйства в нужном количестве воды;
- борьба с наводнениями путем регулирования паводков и проведение защитных мероприятий;
- осуществление водных мелиораций в целях обеспечения оптимальной влажности почв путем устройства оросительных и осушительных систем;
- использование водной энергии рек в гидроэлектростанциях;

- содержание судоходных участков рек в требуемом для водного транспорта состоянии посредством регулирования стока, дноуглубления, выправления и шлюзования;
- обеспечение условий для эффективного развития рыбоводства в реках, озерах и водохранилищах;
- борьба с вредными и разрушительными воздействиями вод и др.

1.2. Водные ресурсы и их распределение

По водному законодательству России и бывших союзных республик в государственный водный фонд включаются все виды естественных и преобразованных человеком природных вод — реки, озера, водохранилища и другие поверхностные водоемы, подземные воды и ледники, внутренние моря и другие морские воды страны, а также ее территориальные воды.

В процессе круговорота воды на Земле эти виды природных вод перераспределяются в пространстве и во времени. В результате испарения с поверхности океана гигантские массы влаги перемещаются в атмосферу, а затем в качестве осадков выпадают на сушу и в виде речного и подземного стока снова поступают в Мировой океан. Атмосферные осадки питают реки и озера, подземные воды и ледники, возобновляя потери их водных запасов на сток, испарение, фильтрацию и т. д. По скорости возобновления природные воды подразделяют на медленно возобновляемые (вековые, или статические, запасы) и ежегодно возобновляемые.

Вековые запасы озерных, глубоких подземных и ледниковых вод возобновляются чрезвычайно медленно — раз в сотни и тысячи лет. Поэтому их интенсивное использование может вызвать на длительный период нарушение установившегося равновесия в природе. Практически для различных хозяйственных целей используются в настоящее время и могут использоваться в ближайшей и обозримой перспективе только «неистощимые» природные воды, возобновляемые в течение короткого периода времени.

Наиболее динамичными в смысле расходования и возобновления своих запасов являются речные воды. При относительно небольшом их объеме они в естественных условиях возобновляются каждые 20 сут, а с учетом их регулирования — в течение одного года (для большей части территории страны). Именно ежегодное возобновление речного стока составляет собственно водные ресурсы, в основном удовлетворяющие потребности народного хозяйства в пресной воде. Однако это не значит, что используются только поверхностные воды. Речной сток включает в себя возобновляемые ресурсы озер, ледников, водохранилищ и подземных вод (зоны активного водообмена) в пределах речного водосбора. Водные ресурсы оцениваются объемом среднегодового стока, который устанавливается достаточно надежно по материалам мно-

голетних непрерывных наблюдений во многих речных створах, а там, где данных недостаточно, вычисляется по обобщенным методам.

Суммарный сток рек России и бывших союзных республик в средний по водности год составляет $4740 \text{ км}^3/\text{год}$, или десятую часть суммарного стока рек земного шара. Суммарный сток характеризует их водообеспеченность. По объему возобновляемых водных ресурсов бывший СССР занимал второе место в мире, уступая Бразилии. Однако показатель удельной водообеспеченности — объем стока с единицы площади — в среднем на его территории значительно ниже по сравнению со многими странами (Бразилия, Норвегия, Югославия и др.) и составляет $200 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$ с км^2 . Приведенные показатели стока всех его рек характеризуют только потенциальные водные ресурсы, которые не могут быть полностью использованными из-за временных колебаний стока, а также из-за необходимости сохранения определенной глубины и минимально допустимых санитарных норм расходов воды в реках. Поэтому реальные водные ресурсы значительно меньше среднего многолетнего объема стока рек.

Водные ресурсы распределяются чрезвычайно неравномерно как по территории, так и во времени. Это связано со значительными различиями в физико-географических условиях формирования стока в пределах различных регионов, и в первую очередь с климатом, рельефом, геологическим строением, почвами, растительностью и др. В последнее время отмечается растущее влияние на речной сток хозяйственной деятельности человека. Неравномерность распределения водных ресурсов по территории может быть иллюстрирована табл. 1.1, где приведена водообеспеченность бывших союзных республик в значениях водных ресурсов, приходящихся на одного жителя. В этой таблице приведены две характеристики удельной водообеспеченности: только за счет стока местного формирования и с учетом вод, поступающих из смежных территорий.

При оценке средних значений водных ресурсов следует указать на их чрезвычайно неравномерное распределение во времени как внутри года, так и в многолетнем разрезе. Основная доля годового стока (до 60 %) приходится на два-три весенних месяца, а в южных районах доля весеннего стока в годовом составляет свыше 75 %. Устойчивый сток межени не превышает 5—10 % годового стока. Все это вызывает необходимость регулирования речного стока путем создания водохранилищ и временного накопления в них весенних вод для увеличения расходов воды в межень.

Ежегодные колебания стока также могут быть значительными — в 1,5—2 раза. При этом в многолетнем режиме отчетливо проявляются группировки многоводных и маловодных лет, которые одновременно могут охватывать большие территории. Так, маловодье в отдельные годы (1910, 1920 гг.) распространялось на 95 % площади бывшего СССР, а в 1939 г. охватило практически

Таблица 1.1

Водные ресурсы и водообеспеченность республик бывшего Союза

| Республика | Площадь, тыс. км ² | Водные ресурсы, км ³ /год | | Обеспеченность речным стоком, тыс. м ³ /год | |
|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------|---|-----------|
| | | местного формирования | суммарные | местного формирования | суммарные |
| Россия | 17 075,4 | 4043 | 4270 | 29,2 | 30,9 |
| Казахстан | 2 717,3 | 69,4 | 125,4 | 4,67 | 8,44 |
| Украина | 603,7 | 52,4 | 209,8 | 1,05 | 4,20 |
| Туркменистан | 488,1 | 1,13 | 70,9 | 0,40 | 25,1 |
| Узбекистан | 447,3 | 9,5 | 107,6 | 0,60 | 6,82 |
| Беларусь | 207,6 | 34,1 | 55,8 | 3,55 | 5,81 |
| Кыргызстан | 198,5 | 48,7 | 48,7 | 13,3 | 13,3 |
| Таджикистан | 143,1 | 47,4 | 95,3 | 12,2 | 24,4 |
| Азербайджан | 86,6 | 7,78 | 28,0 | 1,27 | 4,58 |
| Грузия | 69,7 | 53,3 | 61,2 | 10,6 | 12,1 |
| Литва | 65,2 | 12,8 | 28,2 | 3,74 | 6,78 |
| Латвия | 63,7 | 15,2 | 31,9 | 6,01 | 12,6 |
| Эстония | 45,1 | 10,9 | 15,6 | 7,39 | 10,6 |
| Молдова | 33,7 | 1,31 | 12,7 | 0,33 | 3,20 |
| Армения | 29,8 | 6,19 | 8,96 | 2,01 | 2,69 |
| Итого | 22 274,9 | 4414 | 4740 | 16,7 | 17,9 |

всю территорию. Такой же характер имеют и многоводья, наблюдающиеся в отдельные годы практически на всех его реках. Имеющиеся водные ресурсы значительно превышают объем водопользования. Однако для отдельно взятых регионов потребление воды выросло настолько, что поглощает большую их часть. Так, в южной части России оно превышает 50 % среднегодового стока, а в Средней Азии приближается к 100 %. Почти половина взятой из рек воды в процессе использования сбрасывается в реки и водоемы в виде сточных и дренажных вод, а другая часть бесполезно теряется на испарение. Все это, а также увеличение потребления воды в связи с ростом численности населения приведет к снижению водообеспеченности. Это повлечет за собой ухудшение водохозяйственной и экологической ситуации и потребует принятия неотложных мер в первую очередь по сокращению безвозвратных потерь воды и внедрению технологий более экономного использования водных ресурсов.

1.3. Водные проблемы и пути их решения

Ученые и специалисты в области водного хозяйства усматривают существо современных водных проблем в обострении противоречий между ролью вод суши как источника жизни и неотъемлемой части среды обитания человека и ролью природных вод как источника сырья, использование которого необходимо для

развития общественного производства и повышения уровня благосостояния людей.

Само понятие *водные проблемы* возникло несколько десятилетий тому назад, когда постоянно увеличивавшийся водозабор из рек и других водных источников и сброс в них отработанных вод настолько изменил режим и ухудшил качество природных вод, что они перестали полноценно удовлетворять жизненным потребностям человека. В процессе развития водного хозяйства накопились факты неблагоприятного воздействия некоторых водохозяйственных мероприятий на окружающую среду, которые справедливо вызвали тревогу общественности и выдвинули эту тему в качестве одной из самых актуальных и широко обсуждаемых в научной литературе и общественной прессе.

Глобальные аспекты водных проблем вызваны антропогенными изменениями климата, возникшими в связи с искусственным изменением химического состава атмосферного воздуха. При этом наибольшее значение имеет содержание в атмосфере углекислого газа, который усиливает парниковый эффект в атмосфере, пропуская коротковолновую радиацию и задерживая длинноволновое излучение. Увеличение концентрации углекислого газа за счет сжигания все возрастающего количества угля, нефти и других видов углеродного топлива приводит к глобальному потеплению атмосферы, которое оказывает влияние на распределение осадков, а значит, и стока. По данным ГГИ, за счет этого фактора к концу XX века на юге европейской части России и Украины ожидается некоторое уменьшение речного стока: Волги и Днепра — на 6—9 %, Урала — на 10 %, Днестра — на 2 %. В азиатских республиках, в бассейнах Амударьи и Сырдарьи, ожидается увеличение осадков и стока на 5—10 %. Вместе с тем в научной литературе высказывается сомнение о возможности достаточно надежного прогнозирования изменений климата в оценках региональных климатических условий.

Региональные аспекты водных проблем более разнообразны в связи со значительным различием отдельных регионов по уровню обеспеченности водными ресурсами и степени их хозяйственного освоения. В первую очередь следует оценить уровень и характер водопотребления в современных условиях.

К настоящему времени забор «свежей» воды из рек бывшего СССР составляет 300—350 км³/год. Это приближенная оценка в связи с недостаточной достоверностью учета водопотребления и его колебания из-за изменений гидрометеорологических условий различных лет. По данным ГГИ, общее водопользование непрерывно увеличивалось в период развития водного хозяйства. Значения годового водозабора не тождественны потерям водных ресурсов за год. В процессе использования почти половина забираемой воды сбрасывается в реки и водоемы в виде сточных и дренажно-коллекторных вод, остальная часть теряется безвозвратно на испарение, фильтрацию в глубокие горизонты и др. По этим же данным ГГИ, общие безвозвратные потери на 1980 г.

составляли $166 \text{ км}^3/\text{год}$. Они образуются в основном в районах орошаемого земледелия и являются главной причиной уменьшения естественного стока рек. По данным на 1980 г., это уменьшение для Дона составляет 27 %, для Днепра — 28 %, р. Или — 15 %, Кубани — более чем 25 %, а сток рек Амударьи и Сырдарьи оказался практически полностью израсходованным.

Однако уменьшение речного стока в устьях рек из-за непомерно большого водозабора — это только верхняя надводная часть «айсберга» неблагоприятного содержания водных проблем, угрожающая в основном запасам вод внутренних водоемов. Значительно более опасны для людей и окружающей их среды качественные изменения вод рек и водоемов, в бассейнах которых развиваются водохозяйственные мероприятия. Это происходит за счет сброса в речную сеть сточных и дренажно-коллекторных вод, предварительно использованных в коммунальном хозяйстве, промышленности, сельском хозяйстве и других производствах, загрязненных отдельными химическими веществами и элементами, тяжелыми металлами, пестицидами, биогенными веществами и микробными сообществами. Химические вещества могут попадать в водные объекты также прямым путем — с загрязненными атмосферными осадками (дождь, снег). Выпадая на поверхность водосбора, эти загрязнения частично смываются в водотоки и водоемы склоновым стоком с сельскохозяйственных угодий, городских и промышленных территорий, а частично проникают в водоносы с грунтовыми водами.

Поступление в водоемы биогенных веществ, в первую очередь соединений азота и фосфора, стимулирует массовое размножение водорослей, образуя так называемое *антропогенное эвтрофирование*, своего рода «самозагрязнение» водоемов.

Данные об объемах водозаборов и сбросных вод в русловую сеть и за ее пределы по отдельным бывшим союзным республикам приведены в табл. 1.2.

В результате хозяйственного водопользования и резкого уменьшения речного стока в южных районах произошло катастрофическое снижение уровней и ухудшение водно-солевого баланса крупных внутренних водоемов — Арала, Балхаша, Иссык-Куля и др. Так возникла одна из наиболее сложных региональных водных проблем, затронувшая судьбы многочисленного населения региона, его производственную деятельность.

Особенно тяжелой оказалась проблема Аральского моря, обреченного на полное усыхание. До 1960 г. оно наполнялось водами Сырдарьи и Амударьи объемом $56 \text{ км}^3/\text{год}$ (из $110 \text{ км}^3/\text{год}$ водных ресурсов в водосборном бассейне моря). Этот приток поддерживал уровень моря на отметках около 53 м при площади зеркала 66 тыс. км^2 и обеспечивал судоходство и наиболее развитые промыслы, связанные с морем — лов рыбы (до 400 тыс. ц), ондатроводство (более 2 млн шкурок), животноводство на прибрежных землях. Общий рост безвозвратных изъятий стока, главным образом на орошение (площади орошаемых земель в бас-

Таблица 1.2

Объемы водозаборов и сбросов сточных вод в водные объекты по республикам, на 1984 г., км³/год

| Республика | Водозабор | | Сброс сточных вод | |
|--------------|--------------------------|----------------------|-------------------|------------------------|
| | поверхностных источников | подземных источников | в водные объекты | за пределы речной сети |
| Россия | 91,2 | 13,2 | 71,8 | 2,3 |
| Казахстан | 32,5 | 2,3 | 6,9 | 1,0 |
| Украина | 30,4 | 5,8 | 18,7 | 1,1 |
| Туркменистан | 26,4 | 0,46 | 3,1 | 3,1 |
| Узбекистан | 58,4 | 3,1 | 18,3 | 7,5 |
| Беларусь | 1,8 | 1,1 | 2,0 | 0,2 |
| Кыргызстан | 10,7 | 0,92 | 1,1 | 0,11 |
| Таджикистан | 11,8 | 1,43 | 6,0 | 0,11 |
| Азербайджан | 15,1 | 1,5 | 7,3 | 0,02 |
| Грузия | 3,9 | 0,8 | 2,0 | 0,03 |
| Литва | 0,5 | 0,46 | 0,70 | 0,03 |
| Латвия | 0,4 | 0,31 | 0,6 | 0,0 |
| Эстония | 2,9 | 0,4 | 3,3 | 0,0 |
| Молдова | 0,9 | 0,3 | 0,5 | 0,04 |
| Армения | 3,1 | 1,13 | 1,0 | 0,0 |
| В целом | 290 | 33 | 143 | 16,0 |

сейне моря превысили 4 млн га), сократил в 70-е годы приток речных вод к Аралу до нескольких кубических километров в год. В результате уровень моря с начала 60-х годов упал на 13—14 м, площадь зеркала сократилась на 1/3, соленость его вод увеличилась в 2,5 раза. Ухудшается земельный фонд дельт Амударьи и Сырдарьи: наблюдается опустынивание и засоление аллювиальных почв, сокращаются кормозапасы; усыхают рукава дельты, исчезают озерные системы. Деграция Аральского моря привела к ликвидации рыбного промысла и ондатроводства; вода в низовьях рек сильно минерализованна, загрязнена удобрениями и ядохимикатами, здесь резко осложнилась санитарно-эпидемиологическая обстановка.

Ученые и представители общественности предложили следующие пути решения проблемы Аральского моря:

— прекращение развития орошения в бассейне моря и вывод из эксплуатации части уже орошаемых, но малоурожайных земель;

— реконструкция орошаемых систем и рационализация водопользования в целях уменьшения и даже прекращения сброса загрязненных агрохимикатами коллекторно-дренажных вод в гидрографическую сеть;

— установление ежегодно нарастающих минимальных объемов (лимитов) поступления воды к дельтам Амударьи и Сырдарьи, а также к морю;

— развитие в бассейне Аральского моря неводоемких отраслей производства.

Авторы этой программы полагают, что предлагаемый комплекс мероприятий позволит решить не только задачи водообеспечения трудовой деятельности населения района и создания нормальных условий для людей в Приаралье, но и обеспечит обводнение низовьев Амударьи и Сырдарьи. При условии прекращения сброса в Аральское море загрязненных коллекторно-дренажных вод, оно сохранится как живой водоем, хотя и на пониженных отметках.

Проблемы других внутренних водоемов южного региона — Балхаша и Иссык-Куля в основном подобны проблеме Арала. Однако эти озера находятся еще в начале пути к экологическому кризису, который прошел Арал. Уменьшение их уровней связано с забором воды на орошение, а сброс в озера загрязненных коллекторно-дренажных вод приводит к неблагоприятным последствиям для экосистем и проживающего на побережье населения. Решение проблем Балхаша и Иссык-Куля должно включать в себя водоустройство их бассейна с учетом потребностей водообеспечения трудовой деятельности населения и создания для него нормальных условий жизни, сохранения экосистем и самих озер. Водные проблемы рассматриваемого региона дополняются значительным ухудшением качества питьевой воды, источники которой предельно загрязнены и не отвечают санитарным нормам. В связи с этим среди населения отмечается высокая заболеваемость инфекционными болезнями и недопустимо высокая детская смертность. По заключению Всемирной организации здравоохранения, примерно 80 % болезней можно отнести за счет неудовлетворительного водоснабжения и антисанитарии. Поэтому ведущие ученые считают необходимым выполнить срочные работы по обеспечению населения региона качественной питьевой водой, используя для этого артезианские скважины, водоводы и водопроводы, наконец, водоочистку с помощью мембранной технологии — метода, хорошо разработанного и эффективно применяемого во многих странах.

Проблема Каспийского моря существует давно, однако в конце 70-х годов она сильно обострилась в связи с падением уровня моря до отметок, приближающихся к его критической отметке — 29,0 м БС. Многолетнее падение уровня Каспия было вызвано увеличением безвозвратного водозабора в бассейне моря и сокращением притока речных вод примерно на 13 %. Первым практическим шагом по поддержанию уровня моря было прекращение стока морских вод в зал. Кара-Богаз-Гол, который в тот период поглощал и испарял 5—10 км³/год каспийской воды. В 1977 г. залив был перекрыт глухой плотиной и практически полностью обсох. В результате создались неблагоприятные условия для добычи химического сырья, главным образом мирабилита, которая велась здесь с конца прошлого века, под угрозой возможность сохранения в перспективе минерально-сырьевой базы

в зоне залива. Ветровой перенос солей с поверхности дна усохшего водоема угрожал засолению почв и опустыниванию прилегающего района. Так возникла проблема зал. Кара-Богаз-Гол. В связи с планированием на предстоящий период дальнейшего изъятия воды из Волги и других рек бассейна Каспия предлагалось компенсировать дефициты притока в Каспий за счет переброски в бассейн Волги части стока северных рек. Проект многомиллиардной стоимости вызвал обеспокоенность общественности возможными последствиями крупномасштабных перебросок стока. После многих дискуссий в 1986 г. было принято решение о прекращении начавшихся работ по проекту. Проблема зал. Кара-Богаз-Гол была частично решена в 1984 г., когда в плотине, отгораживающей его от Каспия, было устроено временное водопропускное сооружение для подачи воды в залив с регулируемым расходом 2 км³/год. В настоящее время решается вопрос о ликвидации глухой плотины и соединении залива с Каспием.

Эти решения стали возможны в связи с начавшимся в 1978 г. повышением уровня Каспийского моря за счет увеличения на 10 % притока в море и уменьшения на 10 % испарения с его поверхности под влиянием изменившихся климатических факторов. К 1992 г. это повышение составило 1,8 м. Современный подъем уровня Каспийского моря не стоит называть положительным, ибо ущербы от него в связи с освоением и застройкой осушенной в предыдущие 10-летия (при понижении уровня в 1930—1977 гг.) зоны весьма велики.

На этом водные проблемы Каспия не исчерпываются. Регулирование стока Волжско-Камским каскадом для энергетики и судоходства изменило водный режим Волги, привело к снижению высоты и длительности половодий, что негативно сказалось на рыбном хозяйстве. Специально организуемые попуски из Волгоградского водохранилища в период нереста обычно не создают требуемой длительности затопления нерестилищ и плавного спада уровней воды, необходимого для нормального ската мальков. Сбросные воды из районов рисосеяния в дельтах рек загрязнены ядохимикатами, что также представляет угрозу для молоди рыб.

Другие крупные водоемы южной части страны — Черное и Азовское моря, хотя и относятся к зоне внешнего стока, однако связаны с океаном узким и мелким прол. Босфор и поэтому имеют ограниченный водообмен со Средиземным морем. Азовское море, соединяемое Керченским проливом с Черным морем, имеет характер полузамкнутого водоема. Проблемы Черного и Азовского морей значительно обострились в последние годы, что связано в первую очередь с увеличением водозабора для расширения орошаемых полей.

После создания Цимлянского водохранилища практически ликвидировано естественное половодье на р. Дон, а увеличение безвозвратного водозабора и сброса в Азовское море загрязненных стоков способствовало возникновению ряда кризисных экологических явлений и сильно подорвало рыбохозяйственные ресурсы

моря, ранее считавшегося одним из самых рыбопродуктивных не только в нашей стране, но и в мире. Уменьшение притока пресных вод в Азов, являющийся полупроточным водоемом, компенсировалось поступлением соленых вод Черного моря через Керченский пролив. В результате повысилась соленость вод Азова до 12—13 ‰ при оптимальной для рыбного стада 10—11 ‰. Поступающие в Азовское море хозяйственные стоки, а также загрязненные ядохимикатами воды из районов кубанского рисосеяния создают превышение предельно допустимых концентраций по всей гамме техногенных отходов. Сокращение выноса азовских вод в Черное море способствовало накоплению в нем органических веществ и увеличению дефицита кислорода в его водах. Ученые считают, что только уменьшение безвозвратных потерь Дона и Кубани может восстановить рыбопродуктивность Азовского моря и его оптимальную среднюю соленость. Создание же регулирующей плотины по Керченскому проливу, хотя и приведет к уменьшению солености моря, но может вызвать неблагоприятные санитарные условия для моря.

Обострившаяся в последнее время проблема Черного моря связана с биогенным загрязнением его северо-западной части за счет выноса нитратов и других видов биологического загрязнения мощными речными системами Дуная, Днепра и Днестра. Море в этой части практически уже израсходовало запасы растворенного кислорода для нейтрализации биогенных веществ. Ситуация усложняется поступлением в воды моря больших количеств других загрязняющих веществ. В результате здесь создалась весьма неблагоприятная экологическая обстановка, приводящая к заморам рыбы, ухудшению целебных и рекреационных качеств моря.

Проблемы черноморских лиманов напоминают проблемы Азовского моря, которое может рассматриваться в качестве лимана — полупроточного водоема. Уменьшение стока рек, впадающих в свои лиманы (Днестровский, Днепро-Бугский), отсутствие промывок лиманов паводочными и паводочными водами, зарегулированными каскадами водохранилищ, приводит к повышению солености вод лиманов. По мере дальнейшего роста водозабора и уменьшения притока речных вод клин соленых вод проникает все дальше на устьевые участки рек, угнетая сложившиеся там экосистемы.

Рост водопотребления и сброса в реки и водоемы загрязненных сточных и дренажно-коллекторных вод создает многочисленные проблемы качества воды и сохранения природной среды не только в южных, малообеспеченных водой районах. В 1987 г. было принято правительственное постановление по кардинальному решению проблемы сохранения природных богатств Байкала, интенсивно загрязнявшегося особо опасными видами отходов Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. Комбинат перепрофилирован на выпуск другой продукции. Подобная проблема затронула систему бассейна Ладожского озера, для оздоровления которой также требуется провести дорогостоящие меро-

приятия. Исключительно неблагоприятная экологическая обстановка создалась в восточной части Финского залива, куда сбрасываются промышленно-бытовые стоки Санкт-Петербурга.

Из вышеизложенного становится ясным происхождение водных проблем: они порождены хозяйственной деятельностью с использованием вод в масштабах, вызывающих перестройку ранее сложившихся природных процессов в нежелательном для людей направлении. Поэтому решение водных проблем должно быть направлено на сокращение непомерно большого водозабора и полного прекращения сброса в водотоки и водоемы неполностью очищенных сточных вод различного происхождения.

В первую очередь необходимо осуществить следующее: сокращение удельных расходов воды (на единицу продукции, на гектар орошаемых земель, на одного жителя) на 15—20 % за счет наращивания объемов оборотно-повторного промышленного водоснабжения, внедрения безводных технологий, сокращения потерь воды в орошаемом земледелии и повышения уровня эксплуатации систем коммунального водоснабжения.

Водоохраный аспект этих мероприятий по экономии воды очевиден — снижение объема водопотребления неизбежно приведет к уменьшению объемов сбросных вод, а значит, уменьшится количество вносимых в водные объекты загрязняющих веществ.

Однако следует учесть, что простая замена «водной» технологии на «безводную» может привести только к перемещению места сброса загрязняющих веществ из водной среды в атмосферу, из которой значительная часть этих загрязнений, оседая на поверхности речных водосборов, в конечном итоге попадет все же в водную среду с поверхностным стоком. Это еще раз подчеркивает тесную связь между загрязнением атмосферы и гидросферы и свидетельствует в пользу комплексного подхода к вопросам организации охраны окружающей среды, среди которых основным считается снижение выбросов вредных веществ в атмосферу. Однако кардинальным решением задачи охраны водных источников от загрязнения является прекращение сброса в водные источники даже очищенных сточных вод. Этот путь для промышленных предприятий выгоден экономически, поскольку очистка использованных вод для сброса их в реки и водоемы в большинстве случаев дороже создания оборотных систем водопользования.

Следует стремиться к сохранению естественной способности водных объектов к самоочищению. Особенно важны в этом плане попуски воды из водохранилищ в нижние бьефы. Загрязнение водных объектов сточными водами сельского хозяйства должно предотвращаться широким использованием анаэробного сбраживания отходов животноводства, применением биологических методов защиты растений и др. Следует шире использовать частичную деминерализацию оборотных вод в промышленности и коллекторно-дренажных вод в сельском хозяйстве. Защита поверхностных вод от загрязнения должна решаться в тесной взаимосвязи с охраной от загрязнения грунтовых вод, атмосферы и почвы.

1.4. Гидроэнергетические ресурсы и методы их определения

Основные принципы определения гидроэнергетических ресурсов рассмотрены в работах А. Н. Вознесенского, С. В. Григорьева, Н. К. Малинина, В. И. Обрезкова, 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 направлением силы падение рек, т. е. разность уровней в начале и в конце участка реки (рис. 1.1). Числовое значение этой работы можно определить следующим образом. Пусть имеется участок водотока длиной L . При попереч-

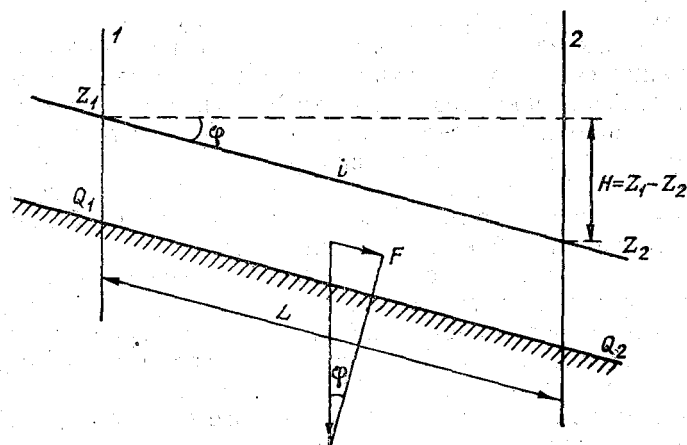


Рис. 1.1. Схема определения потенциальных гидроэнергетических ресурсов на расчетном участке реки.

ном сечении водотока ω объем воды на этом участке равен ωL , 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 $A = mg \sin \varphi \cdot L = \rho\omega Lg \sin \varphi \cdot L$. Длину участка L можно выразить как $L = vt$, тогда $A = \rho\omega vtg \sin \varphi \cdot L$. Принимая во внимание, что $\omega v = Q$, а $L \sin \varphi = H$, и подставляя их, получаем $A = \rho g Q H t$. Мощность потока, т. е. работа 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 $N = 9810 Q H$ Вт, или $N = 9,81 Q H$ кВт. Это строгий теоретический вывод расчетной формулы потенциальной мощности. В других работах (В. А. Бахтияров, Я. Ф. Плешков) формула потенциальной мощности получена упрощенным способом. Принимая работу, совершаемую потоком, за $\rho Q H$ и учитывая, что 1 кВт равен 102 кгм/с, получаем $N = (1000 Q H) / 102 = 9,81 Q H$ кВт.

Потенциальные запасы гидроэнергии определяют, исходя из 8760 часов использования потенциальной мощности или по формуле $\mathcal{E} = 9,81QH8760 = 85900QH$ кВт·ч (8760 — число часов в году). Приведенные расчетные зависимости мощности и энергии потока оценивают потенциальные (валовые), или теоретические, гидроэнергоресурсы крупных и средних рек.

Определению потенциальных гидроэнергоресурсов каждой реки предшествует составление ее водноэнергетического кадастра, включающего в себя общее описание реки и бассейна, исходные

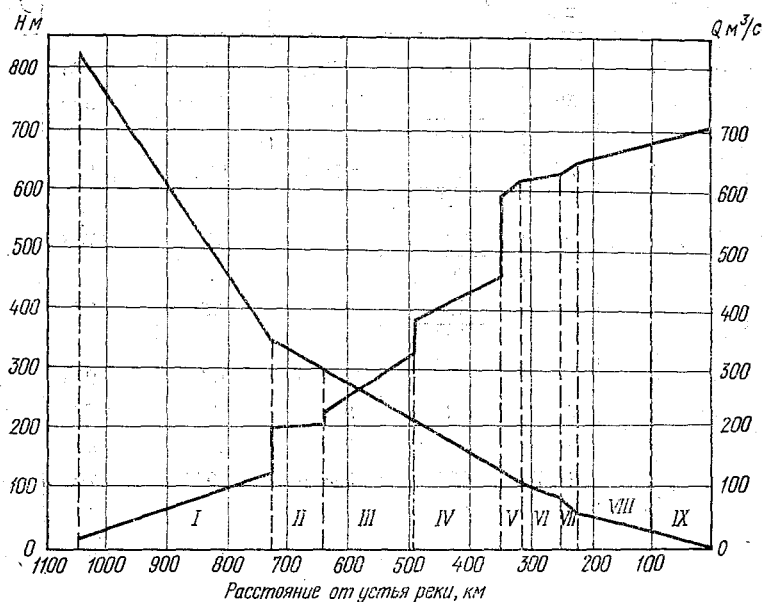


Рис. 1.2. Продольный профиль реки и график нарастания среднегодового расхода воды.

Римские цифры — номера участков.

данные по гидрометрии, гидрологии, топографии, инженерной геологии и пр. При этом строятся кадастровый график, представляющий собой продольный профиль реки, графики нарастания значений 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.

Кадастровый график для одной из сибирских рек с показанием схемы деления на расчетные участки приведен на рис. 1.2. Исчисление потенциальных гидроэнергетических ресурсов произведено в удобной табличной форме (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Потенциальные гидроэнергоресурсы одной из сибирских рек

| Створ (расстояние от устья, км) | Длина участка, км | Высотные отметки, м | Падение на участке, м | Расход воды в замыкающем створе, м ³ /с | | Средний расход воды на участке, м ³ /с | Потенциальная | | |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|--|-------|---|---------------|--------------------|--------------------------------------|
| | | | | начало | конец | | мощность, МВт | энергия, млн кВт·ч | удельная мощность, МВт на 1 км длины |
| 1063 | 343 | 823 | 480 | 14 | | 69,5 | 328 | 2 875 | 0,96 |
| 720 | 76 | 343 | 56 | 125 | | 204 | 113 | 990 | 1,49 |
| | | | | 198 | | | | | |
| 644 | 144 | 287 | 77 | 210 | | 272,5 | 206 | 1 806 | 1,43 |
| | | | | 225 | | | | | |
| 500 | 140 | 210 | 78 | 320 | | 415 | 318 | 2 788 | 2,27 |
| | | | | 380 | | | | | |
| 360 | 38 | 132 | 21 | 450 | | 599 | 123 | 1 078 | 3,24 |
| | | | | 590 | | | | | |
| 322 | 57 | 111 | 18 | 608 | | 616,5 | 109 | 955 | 1,91 |
| 265 | 58 | 93 | 31 | 625 | | 640 | 195 | 1 708 | 3,35 |
| 207 | 105 | 62 | 32 | 655 | | 666 | 209 | 1 832 | 1,99 |
| 102 | 102 | 30 | 28,7 | 677 | | 688,5 | 194 | 1 700 | 1,90 |
| 0 | | 1,3 | | 700 | | | | | |
| | | | | | | Сумма | 1795 | 15 732 | |

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

Исчисление потенциальных энергетических ресурсов малых рек производится по формуле, которая была предложена С. В. Григорьевым:

$$N = \alpha_m N_0,$$

где $N_0 = 9,81 Q_y \Sigma H$. Здесь N_0 — теоретическая мощность в устье реки при использовании расхода в устьевом створе (Q_y) на полном падении реки (ΣH); α_m — коэффициент теоретической мощности, равный отношению потенциальной мощности реки, вычисленной как сумма мощностей последовательных участков реки ($N_p = 9,81 \Sigma (Q_i H_i)$) к предельной мощности, сосредоточенной в устье ($N_0 = 9,81 Q_y \Sigma H$). 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 α_m подсчитываются потенциальные мощности остальных малых рек данной группировки.

Под малыми понимаются реки длиной 26—100 км, как и принято в справочнике по водным ресурсам.

Валовый теоретический потенциал энергии речного стока наиболее полно определен в 1961 г. При этом подсчетом были охвачены 4483 реки. Неучтенные ресурсы составили всего 3 %.

Потенциальные гидроэнергоресурсы всех рек России и других республик бывшего СССР 3942 млрд кВт·ч, в том числе крупных и средних рек 3338.

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 гидроэнергopotенциал*. 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 гидроэнергopotенциалом колеблется от 0,18 (Сырдарья) до 0,91 (Ангара с учетом подпора Байкала). В целом по бывшему СССР этот коэффициент составляет 0,53.

Наибольший интерес для хозяйства имеет экономический гидроэнергopotенциал — 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 гидроэнергopotенциал — величина переменная, зависящая от экономической конъюнктуры.

По оценке 1961 г., технический и экономический гидроэнергopotенциал всех рек составил соответственно 2106 и 1095 млрд кВт·ч. Степень освоения экономического гидроэнергopotенциала (на 1.01 1992 г.) по территории бывшего Союза составляла 22,6 %. В промышленно развитых странах эта величина колеблется от 40 до 95 %.

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 сохранения 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 данных критериев следует ожидать снижение экономического гидроэнергетического потенциала в районах Центра, Юга, Северо-Запада европейской части России, Западной Сибири и некоторых районов Дальнего Востока. Экономический гидроэнергетический потенциал Кавказа, части районов Сибири и Средней Азии может повыситься.

Экономическая и социальная ненадежность ряда эксплуатируемых гидроэнергетических комплексов с водохранилищами, обладающими большими площадями водного зеркала и объемами воды, привела к активизации использования экологически чистых нетрадиционных энергоресурсов: геотермальных, морских приливов и волн, солнца и ветра, малых рек.

Запасы геотермальной теплоты в виде термальных вод в России относительно невелики и сосредоточены в основном на Камчатке. Там же с 1967 г. эксплуатируется геотермальная электростанция мощностью 2,5 МВт.

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.

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 разработано 50 интересных проектов СЭС и 13 из них утверждены к использованию. С 1985 г. в Крыму работает гелиостанция мощностью 5 МВт, эта самая экологически чистая электростанция.

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.

1.5. Комплексное использование водных ресурсов и связь их с природными и экономическими условиями

Наличие водных ресурсов является неперенным 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);
- мелиорации — 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 неблагоприятными для растениеводства внутригодовым распределением осадков. Районы Средней Азии, Крыма, Закавказья и др., характеризующиеся благоприятными почвами и большим количеством тепла, отличаются исключительно низким естественным увлажнением. Поэтому орошение земель здесь является фактором, определяющим вообще возможность ведения полевого земледелия. Дополнительного увлажнения требуют сельскохозяйственные культуры на юге Украины и Молдавии, в Приазовье, Южном Поволжье и др.

В зоне избыточного увлажнения (Беларусь, Прибалтика, 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 то же время в дренажной сети (элемент осушения) нуждаются многие оросительные системы в аридных районах Средней Азии.

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

В некоторых горных районах, например в Грузии, Армении и Азербайджане, имеются места, где без искусственного орошения ведение сельскохозяйственного производства невозможно, а рядом с ними имеются участки с переувлажненными землями (в долинах рек), требующими осушения.

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 народного хозяйства и его восстановления после войны были освоены энергетические ресурсы равнинных рек европейской части России. Широко развернулось строительство ГЭС в Закавказье. В 60-е годы началось строительство ГЭС на реках Сибири, Средней Азии и Дальнего Востока, что связано с интенсивным их 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 отраслью, 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 ме-

лиорации 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. Каковы наиболее важные задачи, решаемые водным хозяйством?
2. В чем состоят водные проблемы отдельных регионов и пути их решения?
3. Сформулируйте определение теоретического, технического и экономического гидроэнергетических потенциалов. Каким путем они могут быть установлены?
4. Какова степень достигнутого использования экономического гидроэнергетического потенциала?
5. В чем состоят принципы комплексного использования водных ресурсов?

Глава 2

ТРЕБОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ ХОЗЯЙСТВА К ВОДНЫМ РЕСУРСАМ И ИХ КАЧЕСТВУ

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 иллюстрирована схемой

на рис. 2.1. Организация производственного процесса предприятий с выходными днями в конце недели определяет недельную неравномерность водопользования. Суточная динамика использования воды связана с работой предприятий в определенной части суток и увеличением расхода воды населением в течение нерабо-

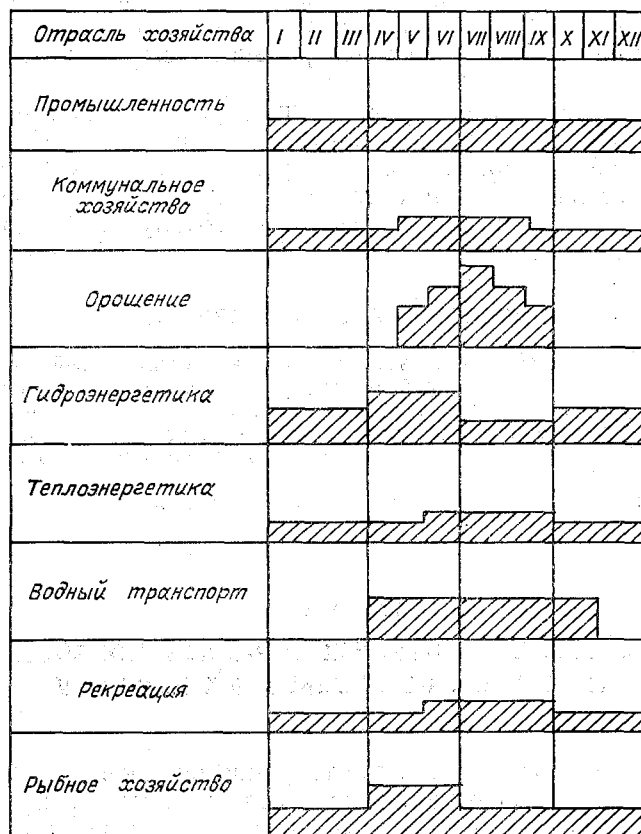


Рис. 2.1. Динамика водопотребления в течение года различными отраслями хозяйства.

чей части суток, а также с уменьшением общего водопользования в ночные часы.

Режим водопользования для отраслей хозяйства, как правило, не отвечает естественному режиму водности рек, являющихся основным источником водообеспечения. Поэтому возникает необходимость перераспределения водных ресурсов во времени в соответствии с характером водопользования. Наряду с требованиями к режиму водообеспечения отдельные отрасли хозяйства выставляют определенные требования к качеству подаваемой воды, т. е.

к ее химическим и биологическим показателям. Это связано с антропогенным загрязнением водных источников, в результате чего их воды становятся непригодными для использования.

Ниже рассматриваются особенности режима водопользования основными отраслями хозяйства с указанием потребляемого ими количества воды и требуемого ее качества. Эти характеристики являются определяющими при планировании водохозяйственных мероприятий, по ним устанавливаются размеры и производительность проектируемых водохозяйственных установок.

2.1. Нормы, расход и режим хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения

Обеспечение водой населения, промышленных предприятий и сельского хозяйства является одной из важнейших задач водного хозяйства, от успешного решения которой зависит состояние здоровья людей, уровень благоустройства населенных пунктов и экономики.

Системы водоснабжения подают воду самым различным ее потребителям. Большинство видов использования воды можно свести к следующим основным категориям:

- хозяйственно-питьевые потребности населения в жилых местах и на производстве;
- производственные потребности воды, используемой в технологических процессах различных предприятий, как промышленных, так и сельскохозяйственных;
- расходование воды для благоустройства населенных пунктов и предприятий — поливка и мытье улиц, газонов, зеленых насаждений;
- расходы воды на пожаротушение.

Использование воды на орошение не включается в понятие *водоснабжение*, так как составляет отдельную отрасль народного хозяйства. Расчет хозяйственно-питьевых и производственных потребностей в воде отдельных населенных пунктов, производств или хозяйственных комплексов ведется на основе специальных норм потребления воды. Нормы устанавливают расчетные среднесуточные расходы воды на хозяйственно-питьевые нужды на одного жителя в зависимости от благоустройства населенных мест и жилых зданий, уровня их санитарно-технического оборудования (табл. 2.1).

При планировании сетей хозяйственно-бытового водоснабжения учитывается неравномерность внутрисуточного потребления воды населением. Нормами регламентируется распределение расходов воды по часам суток в зависимости от размеров населенного пункта и степени его благоустройства.

Нормы расхода воды на поливку в населенных пунктах и на территориях промышленных предприятий принимаются в зависимости от типа покрытия территории, способа ее поливки, вида

Таблица 2.1

Нормы хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов

| Степень благоустройства населенного пункта | Среднесуточная норма хозяйственно-питьевого водоснабжения на одного жителя, л/сут |
|---|---|
| Застройка зданиями, оборудованными внутренним водопроводом и канализацией, без ванн | 125—160 |
| То же с ваннами и местными водонагревателями | 160—230 |
| То же с централизованным горячим водоснабжением | 230—350 |

Примечание. Наибольшие значения относятся к южным районам, наименьшие — к северным.

насаждений, климатических и других местных условий. Для южных городов допускается дополнительный расход воды на поливку зеленых насаждений и приусадебных участков в размере 0,5—1 м³/сут на одного жителя. Нормы расхода воды на хозяйственно-питьевые нужды на промышленных предприятиях разработаны в зависимости от типа производств, так, например, в горячих цехах — 45 л, а в остальных — 25 л на 1 человека в смену.

Расходы воды на производственные нужды промышленных и сельскохозяйственных предприятий определяются характером и объемом производства и принятыми технологическими процессами, поэтому необходимое предприятию количество воды устанавливается специалистами-технологами. На предприятиях различных отраслей промышленности вода расходуется на охлаждение нагреваемых в процессе производства агрегатов, механизмов, промывку обрабатываемых материалов, парообразование, гидравлический транспорт и т. п. Значительное количество воды в промышленности используется теплоэнергетикой: для охлаждения теплообменников современных мощных электростанций, в том числе и атомных.

Потребление воды на промышленных предприятиях устанавливается из расчета расхода воды на единицу промышленной продукции, который зависит от схемы, технологического процесса, местных условий, типа оборудования и поэтому бывает разным даже на аналогичных предприятиях. Средние значения удельного водопотребления при выпуске отдельных видов промышленной продукции изменяются от 3—5 при добыче угля до 2500—5000 м³/т при производстве синтетического волокна.

Расходы воды на пожаротушение устанавливаются соответствующими нормативами в зависимости от размеров населенных пунктов, расчетного числа жителей, плотности застройки, характера производства и степени огнестойкости зданий промышленных предприятий. Учитывается также расчетное число возможных пожаров на территории города или промышленного предприятия.

В промышленном водоснабжении используются следующие

схемы подачи воды: *прямоточная, оборотная и последовательного использования* воды на различных установках.

При *прямоточной* системе вода забирается из водного источника и после ее использования в производственном цикле и частичной очистки или без очистки (отработанная вода) обычно сбрасывается в тот же водный объект на некотором удалении ниже водозабора. При *оборотной* системе использованная вода после доведения ее до определенной кондиции (охлаждение, очистка) снова направляется для использования на этом же производстве. Предусматривается добавление из источника только некоторого количества «свежей» воды для восполнения потерь при обороте и охлаждении. Обратное водоснабжение позволяет снизить количество сбрасываемых в водные объекты загрязненных сточных вод.

Система *последовательного использования* воды устроена таким образом, что вода, сбрасываемая одним потребителем, используется другим, менее требовательным к ее качеству. Например, хозяйственно-бытовые сточные воды после химической очистки и отстаивания могут быть использованы в некоторых других производственных циклах.

Приведенные выше нормы хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения являются основой для расчета общего расхода используемой воды и проектирования систем централизованного водоснабжения, обеспечивающих водой отдельные районы, населенные пункты или отдельные предприятия. В состав систем водоснабжения входят водозаборные сооружения и насосные станции, очистные сооружения, водоводы и водопроводные сети, регулирующие и запасные емкости для воды.

Размеры отдельных элементов системы хозяйственно-питьевого водоснабжения, число и мощность насосов, диаметры труб устанавливаются путем расчета с учетом количества подаваемой воды и намечаемого режима работы.

Средний за год общий расход воды в течение суток (в м³/сут) на хозяйственно-питьевое водоснабжение и бытовые нужды города или поселка вычисляется по формуле

$$Q_{\text{сут. ср}} = q_{\text{ж}} N / 1000,$$

где $q_{\text{ж}}$ — норма водопотребления из табл. 2.1, N — расчетное число жителей в населенном пункте.

Расчет по формуле дает только средний за год показатель водопотребления. Потребность людей в воде изменяется в течение года в зависимости от погодных условий в разные сезоны года, изменяется по дням недели. Для задач проектирования важно знать наибольшее и наименьшее суточное водопотребление, которые рассчитываются по формулам:

$$Q_{\text{сут. макс}} = K_{\text{сут. макс}} Q_{\text{сут. ср}},$$

$$Q_{\text{сут. мин}} = K_{\text{сут. мин}} Q_{\text{сут. ср}},$$

где коэффициенты суточной неравномерности водопотребления,

согласно рекомендациям, принимаются равными:

$$K_{\text{сут. макс}} = 1,1 \dots 1,3; K_{\text{сут. мин}} = 0,7 \dots 0,9.$$

Для расчета диаметров водоводов необходимо знать минимальный и максимальный часовой расход водопотребления. Они определяются по формулам:

$$q_{\text{ч. макс}} = K_{\text{ч. макс}} Q_{\text{сут. макс}} / 24;$$

$$q_{\text{ч. мин}} = K_{\text{ч. мин}} Q_{\text{сут. мин}} / 24,$$

где $K_{\text{ч. макс}}$ и $K_{\text{ч. мин}}$ — коэффициенты часовой неравномерности водопотребления, вычисляемые по формулам:

$$K_{\text{ч. макс}} = \alpha_{\text{макс}} \beta_{\text{макс}}; K_{\text{ч. мин}} = \alpha_{\text{мин}} \beta_{\text{мин}}.$$

Здесь α — коэффициент, учитывающий степень благоустройства зданий, режим работы предприятий и другие местные условия, принимаемый равным: $\alpha_{\text{макс}} = 1,2 \dots 1,4$, $\alpha_{\text{мин}} = 0,4 \dots 0,6$; β — коэффициент, определяемый по таблицам в зависимости от количества жителей в населенном пункте: при изменении численности населения от 1 тыс. до 100 тыс. жителей и более $\beta_{\text{макс}}$ изменяется от 2,0 до 1,0, а $\beta_{\text{мин}}$ — от 0,1 до 1. Описанным выше путем можно установить только предельные часовые расходы для суток наибольшего и наименьшего водопотребления. Для планирования экономичной работы водопроводных сооружений необходимо определить график внутрисуточной подачи воды. Такие графики устанавливаются на основании анализа фактической работы водоснабжения в городах с условиями жизни, близкими к условиям города, для которого проектируется водоснабжение. В тех случаях, когда система городского водоснабжения одновременно подает воду для технологических нужд предприятий, графики забора воды складываются с графиками хозяйственно-питьевого водопотребления. Обычно все крупные промышленные предприятия расходуют воду сравнительно равномерно в течение суток.

В заключение раздела кратко изложим основные требования к качеству воды при водоснабжении. Под *качеством воды* понимают такое сочетание физических свойств воды, химического и биологического состава присутствующих в ней веществ, которые определяют ее пригодность для конкретных видов водопользования. Хозяйственно-питьевая вода должна быть безвредна для здоровья человека, иметь хорошие органолептические свойства и быть пригодной для использования в быту.

Вода, поставляемая для промышленных нужд, в зависимости от ее целевого использования должна отвечать самым разнообразным требованиям. Качество охлаждающей воды нормируется условиями применения, главным из которых является предохранение от отложений солей в трубах и аппаратах, снижающих эффект охлаждения. Поэтому в используемой для этих целей воде не должно содержаться крупных минеральных взвесей, большого

количества железа, солей кальция. Кроме этих требований, вода, подаваемая для паровых котлов, не должна содержать большого количества солей, растворимость которых уменьшается с повышением температуры (карбонат кальция, силикаты магния и кальция), в результате чего образуется твердая накипь. Наличие в воде фосфатов, щелочей, нефти и поверхностно-активных веществ приводит к загрязнению пара.

Вода для технологических нужд промышленности также должна отвечать разнообразным требованиям в зависимости от типа производства. Ее качество нормируется для конкретных условий и технологий производства, причем многие виды производства предъявляют специфические требования к качеству технической воды: целлюлозно-бумажная промышленность очень чувствительна к мутности воды, сахарная — к минерализации, в текстильной — неприменима жесткая вода, в пивоваренной — противопоказано наличие гипса и т. д. Для всех типов производств составлены ведомственные нормативы по качеству вод.

2.2. Водоснабжение тепловых и атомных электростанций

В энергетическом производстве вода используется преимущественно для охлаждения конденсаторов (теплообменников) современных мощных тепловых электростанций (ГРЭС, ТЭС, АЭС и др.). Кроме того относительно небольшое количество воды используется для выработки пара в котлах (1 л воды дает 1 кг пара), для охлаждения различного оборудования, для транспортирования золы и шлака, для пополнения потерь воды на испарение в градирнях и прудах-охладителях. Часть воды на тепловых станциях утилизируется, а часть охлаждающей воды возвращается в источник или на охлаждающие сооружения: пруды-охладители или водохранилища-охладители (1 кВт мощности требует 10,6 м² площади пруда), градирни, брызгальные устройства.

Расходы воды, подаваемые на тепловые станции, зависят от ее мощности, типа гидромеханического оборудования и времени года.

Количество воды, требуемое для охлаждения оборудования мощных тепловых станций из расчета на один агрегат, приведены в табл. 2.2.

Из таблицы видно, что удельные расходы воды для охлаждения конденсаторов (м³/с на 1 кВт мощности) значительно снижаются с увеличением единичной мощности агрегата.

В среднем на тепловых станциях мощностью 1 млн кВт зимой подается расход воды 30—40 м³/с, т. е. требуются целые реки. Расход циркуляционной воды на АЭС в 1,8—2,0 раза больше, чем на ТЭС.

С точки зрения безвозвратных потерь воды наиболее экономичной является прямоточная система водоснабжения (охлажде-

Таблица 2.

**Расходы воды для охлаждения оборудования мощных тепловых станций
из расчета на один агрегат, м³/с**

| Назначение расходов воды | Мощность агрегата, тыс. кВт | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 |
| Охлаждение конденсаторов * | 2,6—3,0 | 5,2—5,8 | 6,6—7,0 | 8,0—8,5 | 11,0—11,5 |
| | 1,8—2,1 | 3,6—4,0 | 4,5—4,9 | 5,5—5,9 | 7,6—8,0 |
| Охлаждение прочего оборудования | 0,125 | 0,222 | 0,350 | 0,500 | 0,700 |

* В числителе — летом, в знаменателе — зимой.

ния). Однако возможности ее применения, особенно в районах европейской части России и ряда республик, весьма ограничены. Исключением являются места расположения электростанций вблизи крупных водоемов, таких, как Азербайджанская ГРЭС, где применяется прямоточное водоснабжение на базе Мингечаурского водохранилища, Пермская ГРЭС — на базе Камского водохранилища, Ленинградская АЭС — морской водой из Финского залива.

Тепловые станции с прямоточным охлаждением не загрязняют воду, но спускают огромное количество подогретой на 8—10 °С воды по сравнению с речной водой. Это влияет на санитарное состояние рек и водоемов, отрицательно влияет на рыбоводство и способствует зарастанию и цветению воды, т. е. ухудшает ее качество (появляется запах и привкус).

Поэтому по условиям охраны природной среды предпочтительнее оборотные схемы водоснабжения. В настоящее время около 70 % мощностей действующих тепловых станций оборудовано оборотными схемами водоснабжения. Суммарная площадь зеркала водохранилищ (прудов)-охладителей, создаваемых для этих целей, достигла нескольких тысяч квадратных километров, что привело к значительным безвозвратным потерям воды на испарение.

С введением оценки земельных и водных ресурсов создание водохранилищ-охладителей будет менее эффективным. Система же с градирнями и брызгальными установками требует значительно меньших земельных площадей, но при этом увеличивает потери воды на испарение. Поэтому основная часть вводимых в ближайшей перспективе крупных тепловых (конденсационных) станций будет использовать системы водоснабжения с водоемами-охладителями на малых реках, на базе естественных озер и специально создаваемых наливных водохранилищ, а также системы с градирнями. Что касается теплоэлектроцентралей (ТЭЦ, АЭС), то они проектируются и будут проектироваться с градирнями.

Вероятное соотношение систем водоснабжения тепловых станций можно охарактеризовать следующими цифрами: прямоточные системы водоснабжения на реках и комплексных водохранилищах — 20—10 %; оборотные со специально создаваемыми водохранилищами-охладителями — 57—60 %; то же с градирнями — 23—30 %.

2.3. Орошение

Плодородие почв определяется ее способностью непрерывно удовлетворять потребность растений в основных факторах их жизни — воде, пище, тепле, свете, аэрации. Питательные вещества поступают из почвы в растение вместе с водой через корневую систему. Поэтому наличие оптимального влажностного режима почвы является одним из необходимых условий ее плодородия.

Водный режим почвенного слоя в пределах отдельного земельного массива или отдельного участка определяется динамикой элементов их водного баланса: приходных осадков P , притока воды через границы участка по его поверхности V и внутри почвы G , конденсации в почве атмосферной влаги A ; расходных — суммарного испарения E с поверхности почвы и растений (транспирация), оттока вод за границы почвенного слоя по его поверхности S и внутрипочвенным путем I . С учетом этих элементов можно записать следующее уравнение водного баланса почвенного слоя в пределах участка за определенный период времени:

$$\Delta W + \Delta V = (P + V - S) + (G + A - I) - E,$$

где ΔW и ΔV — изменения запасов соответственно внутрипочвенных и поверхностных вод на участке за рассматриваемый период времени.

Для условий недостаточного естественного увлажнения изменение влагозапасов почвенного слоя земельного массива за рассматриваемый период времени запишется так:

$$\Delta W = P - y - E_{\text{п}} - E_{\text{т}},$$

где y — итоговый сток с рассматриваемой площади участка, $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{т}}$ — испарение с поверхности почвы и транспирация.

В условиях недостаточного увлажнения поверхностный сток практически отсутствует, за исключением весьма редких случаев выпадения сильных ливней. Поэтому приращение почвенной влажности ΔW зависит от колебания осадков и испарения и может быть положительным или отрицательным; соответственно изменяется и общий запас влаги $W + \Delta W$, где W — влагозапас почв в начале периода.

В районах с недостаточным общим увлажнением или с неблагоприятным распределением осадков во времени возникает необходимость пополнения запасов влаги искусственным путем, т. е. орошением. При этом считается, что систематическое орошение

необходимо проводить в районах с годовым количеством осадков до 250 мм и высокой испаряемостью, а при больших годовых осадках необходимо периодическое орошение, во время засух или для влаголюбивых растений.

Эффект орошения сказывается не только на повышении урожайности сельскохозяйственных культур, но и на ее устойчивости и гарантированности. Однако из-за серьезных недостатков и упущений на значительной части орошаемых земель все еще не достигается планируемое повышение урожайности. Как правило, орошение производят в вегетационный период для обеспечения водного питания растений в текущем году. Оно может осуществляться и в невегетационный период для подготовки почв под урожай будущего года.

Количество воды, необходимое культуре на один гектар площади за один полив, называется *поливной нормой*, а за весь вегетационный период — *оросительной нормой*.

Первоначально определяются оросительные нормы нетто, т. е. количество воды, необходимое непосредственно растению для нормального его развития и роста. Затем вычисляют нормы брутто, учитывающие не только полезную затрату воды, но и ту ее часть, которая уходит на испарение и фильтрацию на полях и в оросительных каналах.

Оросительная норма, т. е. количество воды, которое должно быть дано определенной культуре за весь вегетационный период, вычисляется из следующего уравнения

$$M = E - \alpha P - W_{\text{гр}} - \Delta W,$$

где M — оросительная норма; E — суммарное водопотребление культуры; P — количество осадков за период вегетации, заданной 75—95 %-ной обеспеченности; α — коэффициент использования осадков, принимаемых равным 0,3—0,5 для засушливой зоны и 0,5—0,7 для зоны недостаточного и неустойчивого увлажнения; $W_{\text{гр}}$ — количество влаги, поступающей к растениям от грунтовых вод (при близком их залегании к поверхности земли); ΔW — разница между запасами почвенной влаги в начале и конце вегетации. Все величины, входящие в уравнение, измеряются в кубических метрах на гектар.

По А. Н. Костякову, суммарное водопотребление устанавливается в зависимости от размера планируемой урожайности культуры:

$$E = UK,$$

где U — планируемая урожайность, т/га; K — коэффициент водопотребления, показывающий количество воды, требуемое для создания единицы массы урожая (принимается по опытным данным научно-исследовательских учреждений). Значения коэффициентов водопотребления и суммарного водопотребления изменяются в широких пределах в зависимости от вида культур, климатических условий района, уровня освоения орошаемых земель.

Оросительная норма изменяется в зависимости от зоны возделывания культур, биологических особенностей растения, погодных условий в период вегетации и других факторов. При проектировании и эксплуатации оросительных систем разрабатывают проектные оросительные нормы для условий среднесухого года (75 %-ной водообеспеченности) или года 95 %-ной обеспеченности (дефицита водопотребления).

Рассмотренные выше принципы и методы расчета оросительной и поливной нормы устанавливают режим орошения отдельной сельскохозяйственной культуры. При разработке режима орошения площадей, занятых совокупностью культур севооборота, необходимо суммировать режимы орошения полей всех культур севооборота, учитывая потребность в воде каждой культуры, почвенные условия каждого поля, организацию орошаемого хозяйства и др. Основной задачей такого расчета является получение временного графика гидромодуля, представляющего собой суммарный потребный расход воды в метрах в секунду на 1 га площади посева культур севооборота.

Гидромодуль q для полива отдельной культуры вычисляется по следующей формуле: $q = \alpha m / (86400t)$. Здесь α — доля площади, занимаемой рассматриваемой культурой, % всей площади орошаемого массива севооборота; m — поливная норма, м³/га; t — продолжительность полива, сут (коэффициент 86400 введен для пересчета времени в секунды).

Вычисленные по этой формуле гидромодули для каждой культуры наносятся на хронологический график в пределах принятых сроков полива. При совпадении сроков полива ординаты гидромодулей складываются. В результате такого построения получают так называемый *неукомплектованный график поливов*, один из вариантов которого изображен на рис. 2.2. Неукомплектованному графику свойственны резкие колебания ординат гидромодуля. Строгое соблюдение установленного таким образом режима полива привело бы к значительным эксплуатационным неудобствам: чрезвычайно неравномерной нагрузке оросительной системы и излишним затратам на строительство оросительных каналов, которые должны быть рассчитаны на пропуск высоких расходов воды. Эти недостатки устраняют путем некоторого изменения продолжительности поливных периодов для отдельных культур без изменения средних дат поливов. С этой целью из формулы гидромодуля обратным расчетом вычисляют новую продолжительность полива культуры $t = \alpha m / (86400q_{\text{ср}})$, где $q_{\text{ср}}$ — ордината гидромодуля сглаженного графика. Такие расчеты выполняют для всех поливов и культур.

По пересчитанным для новых периодов t гидромодулям строят новый график, который показывает более равномерную подачу воды на поля в течение относительного периода. Этот график называют *укомплектованным графиком полива*. На рис. 2.2 в качестве примера приведен укомплектованный график, полученный путем перестройки неукомплектованного графика. Сопоставление

этих графиков показывает, что в данном примере максимальную ординату гидромодуля удалось понизить, а минимальную — поднять.

По данным значениям гидромодулей определяется расчетный расход воды на орошаемые площади, исходя из которого производится гидравлический расчет оросительной сети.

В процессе транспортировки воды от источника до орошаемых полей часть ее теряется на фильтрацию в грунт через дно и от-

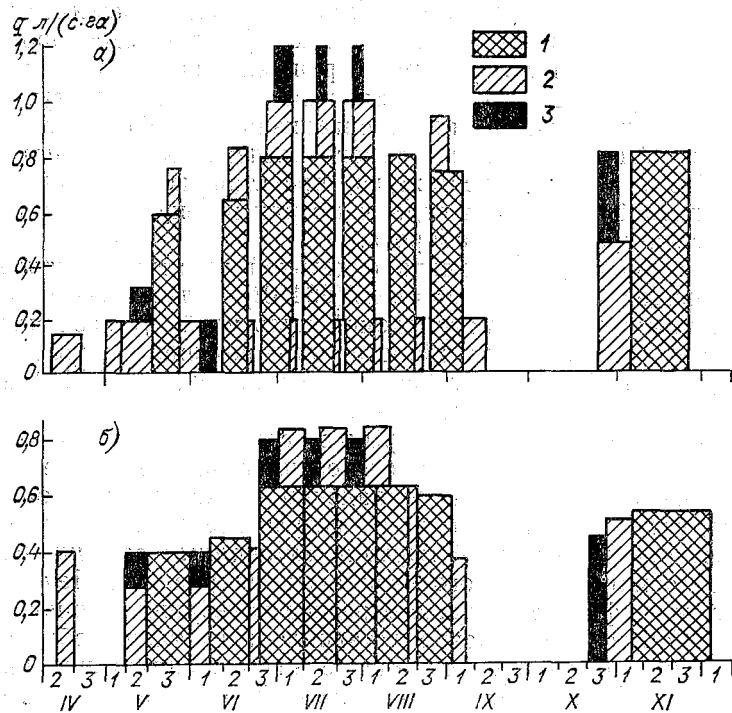


Рис. 2.2. График полива.

а — укомплектованный, *б* — неукомплектованный; 1 — хлопчатник, 2 — люцерна, 3 — кукуруза.

косы каналов, на различные утечки воды из каналов и испарения с водной поверхности оросительной системы. Поскольку потери на испарение составляют всего 4—7% потерь на фильтрацию ими обычно пренебрегают.

Следует отметить, что фильтрационные потери воды в каналах на действующих оросительных системах очень велики. Они определяют низкий коэффициент полезного действия оросительных систем, представляющий собой отношение количества воды, поданной на поля (объем нетто), к количеству воды, взятой из источника (объем брутто). В целом этот коэффициент составляет 0,55

следовательно, потери оросительной сети оцениваются в 45 % общего водозабора. Отрицательное влияние низкого коэффициента полезного действия заключается не только в больших непроизводительных потерях воды, но и в том, что эти потери вызывают подъем уровня грунтовых вод и, как следствие, засоление и заболачивание орошаемых земель. Проведение противофильтрационных мероприятий, таких, как бетонирование каналов, замена их лотками, широкое применение уплотнения русел каналов и другие, позволяет повысить коэффициент полезного действия оросительных систем.

Рассмотрим вопросы оценки качества оросительных вод, которые в связи с антропогенным загрязнением природных вод в современный период приобретают актуальное значение. Качество оросительной воды оценивается комплексно, с учетом влияния на почву, растения и сооружения мелиоративной системы. Принципы этой оценки заключаются в регламентировании показателей качества по экологическим, агрономическим и техническим критериям. Экологические критерии оценивают качество воды с точки зрения охраны объектов окружающей природной среды от загрязнения. Агрономические критерии служат для оценки качества воды с точки зрения предохранения почв от засоления, нарушения микробиологического режима, обеспечения продуктивности растениеводства и доброкачественности сельскохозяйственной продукции. Технические критерии оценивают влияние качества воды на сохранность и работоспособность устройств оросительной сети. Нормативная документация определяет требования к качеству воды с учетом климата региона, глубины залегания и химического состава подземных вод, свойств почв, техники и технологии орошения и др.

2.4. Водный транспорт и лесосплав

Водный транспорт — важный компонент водохозяйственных систем, в которых реки, озера, водохранилища и крупные каналы используются в судоходных целях для грузовых и пассажирских перевозок.

Грузооборот речного транспорта составляет небольшую долю (около 4 %) в общем грузообороте, что объясняется сезонностью его работы, несовпадением в некоторых районах внутренних водных путей с основным направлением грузопотоков, наличием порекастов и порожистых участков и другими причинами. Несмотря на это он имеет существенное значение для различных отраслей народного хозяйства. Водный транспорт удобен для перевозки массовых грузов на большие расстояния и особенно эффективен в районах, богатых полезными ископаемыми, но лишенных шоссейных и железных дорог. Себестоимость перевозок водным транспортом по сравнению с железнодорожным, автомобильным и воздушным транспортом значительно ниже.

Требования водного транспорта сводятся к тому, чтобы на водных путях в навигационный период поддерживались необходимые для плавания габариты пути: глубина, ширина и радиус закругления. Эти габариты устанавливаются на всем протяжении эксплуатируемого водного пути в зависимости от типов и размеров судов, лесосплавных устройств и т. д. Движение судов на внутренних водных путях допускается не по всей их ширине а только по той части водного пространства, которая подготовлена для судоходства и обозначена на местности специальными знаками. Эту часть называют *судовым ходом*. Минимальные (нормируемые) глубина, ширина и радиус закругления судового хода отсчитываются от отметки низкого меженного уровня, называемого *проектным (ПУ)*. Отметка проектного уровня находится по многолетней кривой продолжительности среднесуточных уровней за период навигации при определенной обеспеченности. Обеспеченность назначается в зависимости от значения реки или ее участка как транспортного пути и заключена в пределах 95—99 % — для водных путей с интенсивным судоходством или сплавом леса в плотках, 90—95 % — для путей с менее интенсивным судоходством, 80—90 % — для путей с интенсивным и нерегулярным судоходством.

Гарантированные габаритные размеры пути и отметка проектного уровня по опорному гидрологическому посту устанавливаются в настоящее время на основании технико-экономических расчетов.

Обеспечить нормальные условия для судоходства возможно проведением ряда мероприятий: шлюзованием (созданием подпора), землечерпанием и скалоуборкой, а также выправлением или сужением русла (дноуглублением).

Наиболее эффективным, а иногда единственным, средством улучшения сети водных путей служат водохранилища. С созданием водохранилища длина судового хода по сравнению с длиной хода по реке сокращается в среднем на 5—15 %. В несколько раз увеличивается ширина судового хода, что позволяет повысить скорость движения судов на 10—15 %. Благодаря значительным судоходным попускам из водохранилища в течение периода открытого русла в нижнем бьефе обеспечиваются нормируемые глубины воды на водных путях. Следует заметить, что производство судоходных попусков сокращает возможность забора воды для орошения и накладывает ограничения на режим работы ГЭС в зимний период.

Создание водохранилищ и регулирование ими стока имеет и неблагоприятные последствия для водного транспорта: усиление ветра и увеличение волны на водохранилищах; резкие и значительные колебания расходов и уровней воды в нижних бьефах; осложнения в работе водного транспорта в периоды перекрытия русла и первоначального заполнения водохранилища.

Преобразование режима рек водохранилищами в России сыграло решающую роль в развитии речного транспорта. Это

особенно наглядно видно на примере рек Волги, Енисея и др. Судосходные глубины на этих реках возросли от 1,5—2,0 раз на Волге до 2,0—2,5 раз на Каме. Это позволило перейти на эксплуатацию самоходных судов большой грузоподъемностью вместо использовавшихся ранее барж. Строительство гидроузлов и образование водохранилищ способствуют созданию единой глубоководной системы внутренних водных путей европейской части бывшего СССР. Уже в настоящее время грузы в судах из его внутренних районов без перевалки перевозятся в порты Балтийского, Каспийского, Белого, Черного и Средиземного морей.

Превращение рек в каскады водохранилищ и зарегулирование их стока существенным образом изменили условия лесосплава. Перевозка леса в судах практически полностью ликвидировала аварийность, потери древесины и засорение ею водохранилищ.

Решающим фактором при определении нормируемой глубины судового хода являются перекаты. По длине одной и той же реки перекаты располагаются неравномерно — группами. Участок, где расположена группа перекатов, называется *перекатным участком*. Так как течение воды на перекате всегда неравномерное, а часто бывает и плавно изменяющееся, то перекаты подвержены сильным деформациям. Для путевых работ наибольшее значение имеют ежегодно повторяющиеся циклы намыва и размыва перекатов. Их называют *сезонными деформациями перекатов*. Во время стояния высоких половодных уровней, когда расход русловых наносов достигает максимальных значений, на большинстве перекатов происходит отложение наносов. Плёсовые лощины в это время размываются. Во второй половине спада половодья и в межень на перекатах идет размыв, а в плёсовых лощинах — аккумуляция наносов. Весенняя заносимость перекатов обуславливает необходимость ежегодных дноуглубительных работ.

В связи с разнообразными местными условиями на отдельных перекатах возможны и намывы их гребней во второй половине спада паводка. Этот намыв не бывает большим, но, так как он происходит при низких уровнях, на таких перекатах требуются неоднократные дноуглубительные работы.

На реках, сток которых зарегулирован водохранилищами, можно видеть существование противоположных тенденций в отношении состояния перекатов. С одной стороны, редкая повторяемость половодий и снижение их высоты сильно уменьшает объем весенних отложений наносов на перекатах. Так как при этом уменьшается и размыв плёсовых лощин, то намечается общая тенденция к смягчению различий в высоте дна плёсов и перекатов, т. е., как иногда говорят, к канализации русла. С другой стороны, высокие меженные уровни могут ограничивать размыв перекатов, а ограниченность размыва вместе с возросшей высотой донных гряд должна способствовать сохранению гребней перекатов на относительно высоких отметках. На участках с притоками перекаты могут пополняться наносами, выносимыми из притоков. Выше устьев крупных притоков состояние перекатов заве-

домо должно ухудшаться. Общий вывод может состоять только в том, что между создаваемым за счет регулирования стока приращением меженных уровней ΔZ и приращением глубины на гребнях перекатов ΔT реальны неравенства обоих знаков: $\Delta T \cong \Delta Z$. Получается ли приращение глубин больше приращения уровней или наоборот, т. е. преобладают ли явления размыва или намыва, зависит от конкретных условий на данной реке.

В современных условиях на судоходных свободных реках планируются так называемые *дифференцированные габаритные размеры пути*, т. е. изменяющиеся в зависимости от высоты стояния уровней воды на опорном гидрологическом посту (предложение

Л. И. Кустова). Для нижних бьефов гидроузлов, т. е. участков зарегулированных рек, где наблюдаются постоянные и значительные по высоте колебания уровней воды, дифференцированные габаритные размеры пути не планируются.

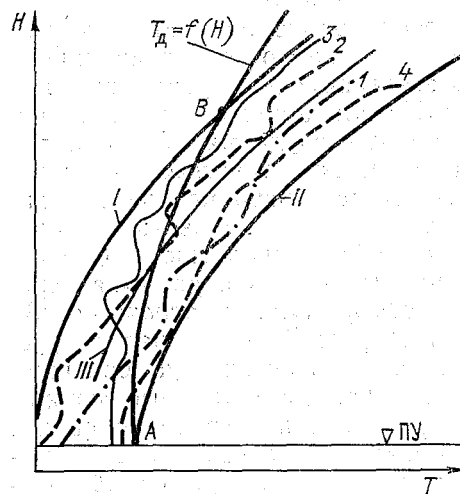


Рис. 2.3. Кривые минимальных фактических (1—4) (T_{ϕ}) и дифференцированных (T_d) глубин в зависимости от уровней воды (H) опорного поста. 1—4 — кривые $T_{\phi} = f(H)$ за 1979—1982 гг. соответственно.

Наиболее простым методом установления дифференцированных глубин является метод, основанный на использовании данных о наименьших глубинах на участках реки, наблюдавшихся на спаде уровней в течение нескольких последних лет. При этом прежде всего строят кривые связи между глубинами и уровнями за три—пять последних навигаций и в каждой навигации, начиная от момента появления глубин, равных 1,25 осадки наиболее глубокосидящих судов, работающих на этом участке реки, и до наступления низких уровней. Кривые строят отдельно за каждый год. Уровни берут только на спаде, т. е. периоды временного подъема уровня воды во время летних паводков опускают.

Годовые кривые связи фактических глубин с уровнями $T_{\phi} = f_1(H)$ совмещают на одном графике (рис. 2.3), на котором строят и плановую кривую дифференцированных глубин $T_d = f_2(H)$. В этом построении вначале находят точку А пересечения проектного уровня (ПУ) и гарантированной глубины. После этого переходят к построению части кривой, расположенной выше проектного уровня. Для этого проводят верхнюю и нижнюю пограничные кривые I и II, осредненную линию III и фиксируют

точку *B* при пересечении верхней пограничной кривой с уровнем, при котором наблюдаются глубины, равные 1,25 осадки наиболее глубокосидящих судов. Затем соединяют точки *A* и *B* плавной кривой. Эту кривую ведут от точки *A* вверх вначале с малыми отклонениями вправо от гарантированной глубины. После же пересечения осредненной линии графика кривую дифференцированных глубин поворачивают вправо более резко и соединяют с точкой *B*. При построении кривой дифференцированных глубин учитывают предполагаемый характер весеннего половодья, предшествующего навигации, объемы землечерпательных и выправительных работ и распределение этих объемов во времени.

2.5. Рыбное хозяйство

Опыт последних десятилетий мирового рыболовства свидетельствует об истощении рыбных запасов в океане и, следовательно, уменьшении улова рыбы. Поэтому в настоящее время значительное внимание уделяется развитию рыбоводства и рыбного хозяйства на внутренних водоемах. Мировой улов рыбы на внутренних водоемах составляет 10—15 % общего улова рыбы и морепродуктов, хотя внутренние водоемы составляют всего немногим более 1 % площади гидросферы. Это свидетельствует о высокой продуктивности внутренних водоемов — в среднем по земному шару она составляет в пересчете на всю площадь 2,5—3 т/км².

Внутренние моря, реки, озера, водохранилища богаты ихтиофауной. Рыбопродуктивность внутренних водоемов зависит от степени эвтрофикации, характера хозяйствования на них и изменяется от нескольких килограммов до сотен килограммов с 1 га акватории водоема, причем для малых и средних озер она составляет 3—10 кг/га, а в Цимлянском и некоторых днепровских водохранилищах достигает 25—40 кг/га. Наибольшая продуктивность отмечается на малых водоемах южной части бывшего СССР, составляя многие десятки и даже сотни килограммов рыбы с 1 га акватории.

Рыбное хозяйство во внутренних водоемах и водотоках является наиболее требовательным участником водохозяйственного комплекса, причем большей частью интересы рыбного и сельского хозяйства, гидроэнергетики и водного транспорта не совпадают. Для нормального развития и успешного воспроизводства различных пород рыб необходимо, чтобы в воде содержалось достаточное количество растворенного кислорода, не было вредных примесей. Кроме того, следует поддерживать соответствующие глубины и температуру воды, что особенно важно в период нереста рыб и развития молоди, а также обеспечивать рыбу необходимым количеством пищи.

Вредное влияние на развитие рыбного хозяйства оказывают следующие факторы:

1. Загрязнение водоемов и водотоков плохо очищенными и неочищенными сточными коммунальными и промышленными водами, а также удобрениями и ядохимикатами; молевой сплав и сопутствующий ему утоп значительного количества древесины.

2. Маловодье. Маловодные периоды в бассейнах реки Волги (1930—1940 гг.), Аральского моря (1960—1965 гг.), ряда сибирских рек резко снизили уровни в Каспийском и Аральском морях; а также в озерах Западной Сибири (Чаны, Убинское, Сартлан и др.). Из-за этого сократились площади их водной поверхности, что снизило уловы рыбы в 2—3 раза.

3. Нарушение установленных правил регулирования рыболовства. Там, где эти правила соблюдаются, достигается заметный рост улова рыбы, например на Каспийском море в последние годы годовой улов осетровых увеличился до 27 тыс. т.

4. Гидротехническое строительство и создание водохранилищ. С одной стороны, плотины на реках являются преградами на пути рыб во время их прихода к местам нерестилищ. С другой стороны, создание водохранилищ дает новые водные пространства, которые могут и должны быть использованы для разведения рыбы. Общая площадь крупных водохранилищ превышает 5 млн га, а уловы составляют около 5% общей добычи рыбы во внутренних водоемах.

Расчеты показывают, что при рациональном ведении рыбного хозяйства на водохранилищах ежегодно может быть получено 1,5—2 млн ц рыбы. Кроме того, появление водохранилищ на реках приводит к смене видового состава рыб. Ценные «аборигены» исчезают, заменяются преимущественно «сорной» рыбой. Низкие уловы и изменение породного состава обусловлены несвоевременным строительством рыбохозяйственных объектов (рыборазводных заводов по выращиванию молоди ценных пород рыб и искусственных нерестилищ в водотоках с нарушенным гидрологическим режимом и др.); загрязнением воды; глубокой сработкой водохранилищ (до 40 м) в зимний период, что приводит к оседанию льда на мелководных участках и в ряде случаев к придавливанию и замору рыб; неудовлетворительной работой рыбопропускных сооружений; недостатком нерестовых площадей в водохранилищах для ценных проходных пород рыб; значительными изменениями гидрологического, гидрохимического и температурного режимов воды в зоне водохранилища (начинаются процессы цветения водохранилища, что связано с появлением вредных сине-зеленых водорослей).

Создание крупных водохранилищ сопровождается не только затоплением нерестилищ в верхнем бьефе, но и их обыканием на протяжении нижнего бьефа из-за снижения полноводных и паводочных расходов в период накопления воды в водохранилищах. Смягчить данный негативный фактор можно только за счет периодических пусков воды из расположенных выше по течению водохранилищ для обводнения нерестилищ, строительства вододелителей и очистки путей движения рыбы.

Большинство водохранилищ имеют низкую рыбопродуктивность (6—20 кг/га). Наиболее рыбопродуктивны Цимлянское и Кременчугское водохранилища. Последнее дает до 8,5 тыс т в год.

Для поднятия рыбохозяйственного значения водохранилищ необходимо продумывать и осуществлять систему нерестово-выростных хозяйств, мелиорацию сохраняющихся нерестилищ, проводить расчистку ложа водохранилища от леса и кустарника, вводить необходимые ограничения в уровень режим водохранилищ и т. д.

Для успешного решения проблем рыбного хозяйства необходимо кроме проведения указанных мероприятий на водохранилищах создание системы товарного рыбоводства на базе прудового тепловодного и холодноводного рыбоводства, на сбросных водах тепловых станций, оросительных каналах и рисовых чеках, а также на озерах. Исключительно высокая продуктивность интенсивного товарного рыбоводства на малых водоемах достигается благодаря искусственному созданию наиболее благоприятных для выращивания рыбы условий: созданию оптимального водного режима, кормовой базы, ограничению загрязнений.

2.6. Борьба с наводнениями

Наводнение — затопление территории водой, являющееся стихийным бедствием, в результате подъема уровня воды в реке, озере или море, вызываемого различными причинами.

От наводнений в большей или меньшей степени страдает население и хозяйство практически всех стран мира. Частые и порою разрушительные наводнения бывают и в ряде районов нашей страны.

Наводнения при весенних половодьях и летних паводках. В зависимости от количества и интенсивности поступления воды с водосбора, размеров основного русла, характера речной долины уровень в реках в половодье и паводки поднимается до 10—15 м, а иногда и значительно больше. Расходы воды при этом увеличиваются в десятки, сотни и даже тысячи раз по сравнению с меженными их значениями. Половодные и паводочные расходы обычно не вмещаются в основные русла, вода изливается в долину, затопляя большие пространства.

Наводнения от половодий и паводков распространены в странах Юго-Восточной Азии, Дальнего Востока, Европы и др. В нашей стране такие наводнения имеют место на Дальнем Востоке, в Закарпатье, на Кавказе, Севере и Северо-Западе, в Центральных районах и т. д.

Наводнения при заторах и зажорах льда. Кроме весенних, летних и осенних наводнений на реках нашей страны бывают еще зимние заторные и зажорные наводнения. Они могут продолжаться

до 1,5—2,0 месяцев и сопровождаться не менее тяжелыми последствиями.

Высокие подъемы уровней от заторов льда в весенние ледоходы характерны для рек, вскрытие которых начинается с верховьев. Обычно это свойственно рекам, текущим с юга на север. Большие массы льда поступают к нижним участкам, где еще сохраняется ледостав. При этом забивается живое сечение, происходит нагромождение льдин, образуются своего рода плотины и, как следствие, подпор уровней. Сильные заторы и высокие подъемы уровней наблюдаются на реках Сухоне, Северной Двине, Иртыше, Днестре, Енисее и многих других.

Зажоры льда с катастрофическими подъемами уровня образуются в период ледостава. Такие подъемы уровней чаще всего наблюдаются на реках Северо-Запада (Нева, Нарва), Карелии (Нижний Выг), Севера (Северная Двина), Сибири (Ангара, Енисей), Средней Азии (Амударья, Сырдарья), Западной Украины (Днестр) и других.

Наводнения при ветровых нагонах и приливах в устьях рек. Нагонные явления, возникающие обычно при сильных ветрах на пологих участках побережья при глубине моря менее 20 м, вызывают довольно сильные наводнения, которые наблюдаются на Каспийском, Азовском морях, в устьях Даугавы, Невы, Северной Двины. Характерными особенностями их являются: внезапность, кратковременность и интенсивность подъема и спада уровня воды.

Наводнения от прорыва защитных дамб. Имеют место повсеместно, где эти дамбы построены — в России, Европе, Китае, Индии, Иране и др.

Наводнения от прорыва озер. Имеют место в горах Средней Азии, на Кавказе, в Карпатах. Так, например, сель, образовавшийся 7 июля 1963 г. в Заилийском Алатау в результате таяния горных снегов и выпадения ливневого дождя, вошел в оз. Иссык, возникшее несколько тысячелетий назад в результате завала высотой 300 м, и поднял его уровень на 1,5 м. Вода перелилась через гребень плотины, быстро размыв низовой откос и прорвала плотину. Весь объем озера, около 80 млн м³, был сброшен в русла горных рек. Наводнение опустошило нижерасположенную горную долину, разрушило ряд предприятий и сотни жилых домов в г. Иссык.

Наводнения от разрушения плотин. Явление сравнительно редкое, но приводит к не менее серьезным последствиям, чем при наводнениях от других причин. По имеющимся данным, около 3% общего количества плотин в мире было подвержено частичному или полному разрушению, что привело к большим затоплениям.

Наводнения в результате хозяйственной деятельности. Создание гидроузлов иногда полностью устраняет ледовые затруднения (Ангара с Иркутской и Братской гидроэлектростанциями), а иногда усиливает их. Примером является усиление заторных наводнений в районе выклинивания подпора от Новосибирского водохранилища на р. Оби.

В нижних бьефах некоторых гидроузлов (Красноярского на р. Енисее, Беломорского на р. Нижний Выг) — из-за резкого увеличения расходов ГЭС зимой и образующейся полыньи наблюдается увеличение шуги, что приводит к значительным зазорным подъемам уровней в районах порожистых участков.

Результатом хозяйственной деятельности является и увеличение числа хранилищ различных продуктов технологического цикла. Наблюдавшийся прорыв плотин таких хранилищ приводит к значительным загрязнениям воды в речных системах.

Самовольная, ни с кем не согласованная застройка пойм ниже гидроузлов также приводит к затоплению этих свежесвоенных территорий уже при сбросе сравнительно невысоких расходов воды и требует изменения режима работы таких гидроузлов, как Иркутский на Ангаре и Волгоградский на Волге.

В настоящее время существуют такие методы борьбы с наводнениями, как регулирование половодий и паводков водохранилищами, сооружаемыми в руслах рек; отвод паводочных вод; регулирование поверхностного стока на водосборах; обвалование; спрямление русел рек; дноуглубление; берегозащитные сооружения; подсыпка территории; комбинированный способ.

При борьбе с наводнениями с помощью обвалований наблюдается стеснение долины дамбами, что приводит к уменьшению естественной аккумуляции и вследствие этого к увеличению максимальных расходов и уровней воды. Это следует учитывать при назначении отметок гребней дамб.

Вопрос о том, какими средствами должна быть решена проблема борьбы с наводнениями, полностью определяется экономикой. Опыт осуществления противопаводочных мероприятий показывает, что наибольший экономический эффект и надежная защита пойменных территорий от наводнений могут быть достигнуты при использовании комплекса мероприятий и прежде всего активных методов защиты (регулирование стока как в русле, так и на водосборной площади бассейна водотока) в сочетании с пассивными методами (обвалование, выправительные работы и т. п.).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы нормы и режим хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения?
2. Сформулируйте требования к качеству и количеству воды для снабжения тепловых и атомных электростанций.
3. Каковы нормы и режим водопотребления в орошаемом земледелии?
4. В чем заключаются требования водного транспорта, судоходства и лесосплава к режиму водотока?
5. Какое влияние оказывает водохозяйственное строительство на воспроизводство рыбных запасов?
6. Каковы причины, обуславливающие наводнения в долинах рек?
7. Перечислите мероприятия по борьбе с наводнениями и какова их эффективность.

ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**3.1. Задачи схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов**

В начале XX в. удовлетворение запросов отдельных водопользователей носило локальный характер и не выходило за границы небольших речных бассейнов. По мере роста народонаселения и сопутствующего ему развития различных отраслей народного хозяйства масштабы использования водных ресурсов непрерывно увеличиваются. Вместо отдельных водопользователей, обеспечение нужд которых не вызывало особых затруднений, все чаще и чаще приходится иметь дело с многими участниками водохозяйственных комплексов, требования которых многообразны и противоречивы.

Для удовлетворения нужд водопотребителей создаются водохранилища, регулирующие речной сток, водоподводящие каналы (им. Москвы, Волга — Увель, Северский Донец — Донбасс, Днепр — Кривой Рог, Днепр — Донбасс, Иртыш — Караганда и др.). Приходится регулировать большие объемы воды и перераспределять их не только во времени, но и территориально.

Одновременно с этим решаются задачи, связанные с очисткой сточных вод и предотвращением дальнейшего загрязнения водоемов и водотоков.

В условиях ведения хозяйства чрезвычайно важно правильно оценить водные ресурсы, учесть и удовлетворить потребности в воде каждой административной единицы (республики, края и области). При этом должны быть обеспечены оптимальные условия для пропорционального и наиболее эффективного развития различных отраслей народного хозяйства. Это предопределило необходимость централизованного управления использованием водных ресурсов, в первую очередь в районах, испытывающих дефицит в воде, а также в местах сильного загрязнения водных источников. Решение комплексных водохозяйственных проблем невозможно без длительных исследований, разработки и сравнения различных вариантов. Рассмотрение их должно основываться на глубоком анализе технико-экономических данных, а также на прогнозе возможных изменений природных условий, не вызывающих резкого нарушения равновесия природных факторов, существовавшего до создания того или иного водохозяйственного комплекса.

Все изложенное свидетельствует о необходимости координации в планировании использования и охраны водных ресурсов. Для этого разрабатывается всесторонне обоснованный водохозяйственный план, который получил наименование схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов (СКИ и ОВР). Разработка схем комплексного использования и охраны водных ресурсов предписывается «Основами водного законодательства». СКИ и ОВР является главным документом, обеспечивающим правиль-

ную водохозяйственную политику. Как правило, она составляется на 30—40 лет вперед с выделением промежуточных расчетных уровней через 5—10 лет. Она разрабатывается для крупных бассейнов, а также для больших экономических районов. При необходимости перераспределения водных ресурсов между различными областями и республиками схема охватывает значительно большие территории, называемые регионами.

Решения, принятые схемой, следует рассматривать как принципиальные, на основе которых ведется составление проектов использования водных ресурсов по отдельным речным бассейнам или части каждого из них.

Основная задача схемы заключается в следующем: оценить водные ресурсы применительно к отдельным речным бассейнам и экономическим районам. При этом должны быть выявлены и учтены данные о влиянии хозяйственной деятельности человека на режим водных источников; выявлены основные требования к воде различных отраслей народного хозяйства для разных периодов их развития; разработаны и научно обоснованы нормы водопотребления; установлена возможность повторного или последовательного использования воды; определен объем безвозвратных потерь, а также намечены пути для их всемерного сокращения; увязаны запросы отдельных водопользователей между собой и среди них выделены те, которые обеспечивают наиболее эффективное и экономическое использование воды; разработаны водохозяйственные балансы по отдельным этапам времени, на основе которых в первую очередь выделены районы, испытывающие наибольший дефицит в воде; намечены первоочередные водохозяйственные объекты, обеспечивающие нормальное развитие экономики данного района без осуществления сложных мероприятий по перераспределению стока между отдельными речными бассейнами; на основе составленных водохозяйственных балансов выработаны предложения по наиболее оптимальному размещению промышленных объектов, транспортных узлов и мелиорируемых сельскохозяйственных площадей; определены основные меры по охране водотоков и водоемов от их истощения и загрязнения; разработаны мероприятия, гарантирующие очистку и обезвреживание сточных промышленных и коммунальных вод, а также их канализацию; оценено изменение природных условий в тех районах и областях, где намечается проведение крупных водохозяйственных мероприятий; обоснованы характер и объем необходимых проектно-изыскательских и научно-исследовательских работ и определен состав их исполнителей. Схема должна быть динамична во времени и обладать необходимой гибкостью, чтобы учитывать изменения, происходящие в жизни страны.

3.2. Водохозяйственные балансы и принципы их составления

Водохозяйственный баланс представляет собой количественную характеристику (соотношение) прихода, аккумуляции и расхода

воды на определенной территории в заданный промежуток времени с учетом хозяйственной деятельности человека.

Водохозяйственные балансы позволяют сопоставить водные ресурсы речных бассейнов или их участков с потребностями в воде — современными или прогнозируемыми на перспективу (для нескольких расчетных уровней развития водопотребления в бассейне реки). Балансы экономических или административных районов определяют путем выборки или обобщения данных по речным бассейнам, включающим в себя эти районы или входящим в них. Назначение водохозяйственных балансов — установить достаточность или нехватку располагаемых водных ресурсов для обеспечения водой имеющихся или намечаемых потребителей, а в некоторых случаях — установить свободные объемы стока, оставшиеся в реке, для использования их за пределами рассматриваемой территории (межбассейновые перераспределения стока).

Для составления водохозяйственных балансов предложен ряд методов. Каждый из них имеет свои преимущества, недостатки и особенности, а следовательно, и оптимальную область применения. Наиболее широко в практике водохозяйственного проектирования используются разработки и рекомендации Гидропроекта и ЦНИИКИВРа.

Водохозяйственный баланс состоит из приходной и расходной частей. Приходная часть баланса включает в себя следующие элементы: естественный поверхностный сток; долю эксплуатационных ресурсов подземных вод, которая гидравлически не связана с поверхностными (не дренируемых реками); возвратные, дренажные, шахтные и сточные воды, поступающие в реку в пределах бассейна или его участка; воды, перебрасываемые из других бассейнов. В число приходных элементов водохозяйственного баланса включают объемы сработки водохранилищ за расчетные интервалы времени. Эти объемы включаются затем в расходную часть баланса (или со знаком минус в приходную) в период наполнения водохранилища. При значительных расстояниях от створа водохранилищного гидроузла до рассматриваемого створа речного бассейна указанные изменения естественного стока должны быть предварительно трансформированы в русле и пойме расчетного участка реки. Если в бассейне реки имеются водохранилища многолетнего регулирования стока, то для определения объемов сработки (и наполнения) водохранилищ необходимо производить водохозяйственные расчеты за период сработки многолетней составляющей полезного объема водохранилищ, включающий расчетный для баланса год. В приходной части баланса необходимо также учесть влияние на речной сток хозяйственной деятельности на водосборе.

В расходную часть баланса обычно входят следующие объемы воды: 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); воды, перебрасываемые в другие бас-

сейны; потери воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ и прудов; потери речного стока, вызванные забором дренируемых подземных вод; расходы попусков воды ниже расчетного створа, необходимые для нормальной работы водозаборов, поддержания санитарного состояния реки, обеспечения судоходства, а в некоторых случаях — обводнения пойм и нерестилищ. Значения этих расходов воды устанавливаются в соответствии с выявленными требованиями различных водопользователей к водным ресурсам реки ниже расчетного створа.

Следует отметить, что при составлении водохозяйственных балансов нет единого подхода к статьям приходной и расходной частей баланса. Здесь необходимо учесть все объемы забора воды выше рассматриваемого створа (с учетом объемов водоотведения), а также объемов необходимых попусков ниже створа.

Расчет водохозяйственных балансов производится в удобной табличной форме для условий стока разной обеспеченности, как правило, 50, 75 и 95 %.

Колебания стока внутри года и сезонная неравномерность водопотребления и водопользования обуславливают необходимость составления балансов по интервалам времени, в пределах которых этими изменениями можно пренебречь. Как правило, можно ограничиваться месячными интервалами времени.

Для сохранения в расчетах реальных соотношений водности в различных частях бассейна рекомендуется составлять балансы для конкретных лет с объемом годового и сезонного (за лимитирующий период) стока в замыкающем бассейн створе и в устьях крупных притоков, близким к объему стока расчетной обеспеченности. При таком подходе, позволяющем автоматически учесть распределение стока между реками и участками рек бассейна, может оказаться необходимым предварительно рассмотреть пять—восемь характерных по водности лет с различным внутригодовым и внутрибассейновым распределением стока и выбрать наиболее неблагоприятные (с наибольшими дефицитами воды).

Во избежание занижения располагаемых водных ресурсов стоков 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 миллионах кубических метров или реже в кубических метрах в секунду с подсчетом соответствующих годовых объемов.

В качестве примера в табл. 3.1 составлен водохозяйственный баланс р. Днепра в условиях маловодного года обеспеченностью по стоку 95 %.

Если для некоторого расчетного уровня развития водохозяйственный баланс сводится без дефицита для всех расчетных интервалов времени по всем рассматриваемым створам, включая

требования к расходам воды ниже замыкающего створа, дополнительных водохозяйственных мероприятий на данном уровне не требуется. Возникновение дефицита воды в отдельные расчетные интервалы времени при отсутствии его в годовом балансе маловодного года свидетельствует о необходимости сезонного регулирования стока. Отсутствие дефицита стока лишь в балансе среднего по водности года показывает необходимость 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.

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

Рассмотренный метод составления водохозяйственного баланса с использованием фактических данных, имевших место в прошлом, достаточно прост и нагляден. Основными недостатками его являются: оценка поверхностных водных ресурсов по данным гидрометрической сети без учета оценок антропогенных нагрузок на речной сток в отдаленной перспективе; упрощенный учет используемых подземных вод; постоянство размеров водопотребления, заданного исходя из условий засушливого года; схематизация учета эффекта регулирования стока водохранилищами и их взаимного влияния. Все это приводит к некоторому снижению достоверности получаемых результатов.

Чтобы избежать указанных ошибок, очевидно, правильнее балансовые расчеты в створах речного бассейна вести по многолетним стоковым рядам с последующей оценкой надежности водобеспечения потребителей на основе статистической обработки результатов. При этом вести детальный учет водопотребителей, позволяющий оценивать колебания водопотребления в пределах территории речного бассейна в зависимости от изменения увлажненности и температуры воздуха. Необходима и оценка эффекта регулирования речного стока системой водохранилищ с учетом их взаимного влияния и территориального размещения. Разработка балансов по этим направлениям возможна лишь с помощью современных математических методов и ЭВМ при условии наличия достоверных математических моделей функционирования сложных водохозяйственных систем. К настоящему времени такие модели теоретически разработаны, но не доведены до широкого практического использования.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Основные предпосылки разработки схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов.
2. Какие задачи решаются при разработке схемы?

3. В чем заключаются методические трудности ее разработки?
4. Что представляет собой водохозяйственный баланс и его отличие от водного баланса?
5. Каково назначение водохозяйственных балансов?
6. Основные принципы разработки водохозяйственных балансов.

Глава 4

ВОДОХРАНИЛИЩА И ИХ ХОЗЯЙСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ

4.1. Определение и типы водохранилищ

Водохранилища — особая категория внутренних водоемов со специфическими особенностями водообмена, проточности и сезонных колебаний уровня. На сегодня нет единого, принятого во всех странах определения водохранилищ и четкого их разграничения с 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 и естественные водоемы с замедленным водообменом объемом более 1 млн м³, уровенный режим которых постоянно регулируется гидротехническими сооружениями для накопления воды в целях ее хозяйственного использования. По мнению А. Б. Авакяна, крупные многоцелевые водохранилища, созданные при гидроэлектростанциях, необходимо рассматривать как сложный системный объект: склад воды; склад гидравлической энергии; акватория, используемая водным транспортом, рыбным хозяйством и в целях рекреации; объект, позволяющий в некоторых регионах существенно улучшить использование земельных ресурсов путем орошения; средство борьбы с наводнениями; объект, существенно изменяющий исходное качество речной воды (в одних случаях улучшая, в других ухудшая его показатели); землепользователь — потребитель земли (затопление, подтопление, переработка берегов); объект, вносящий заметные изменения в природу и хозяйство.

К числу параметров, определяющих основные размеры водохранилищ, следует отнести (рис. 4.1): форсированный подпорный уровень (ФПУ); нормальный подпорный уровень (НПУ); уровень мертвого объема (УМО); полезный объем водохранилища ($V_{\text{полез}}$); мертвый объем ($V_{\text{умо}}$); полный объем водохранилища, соответствующий НПУ ($V_{\text{полн}} = V_{\text{полез}} + V_{\text{умо}}$); площадь водной поверхности водохранилища при НПУ ($F_{\text{нпу}}$); площадь водной поверхности при УМО ($F_{\text{умо}}$).

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

Под УМО понимается наинизший уровень, до которого сбывается водохранилище в процессе нормальной его эксплуатации.

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

Мертвый объем водохранилища, хотя и не принимает участия в регулировании, но имеет большое практическое значение для водохранилища (заиление, санитарные условия, минимальный напор и т. д.).

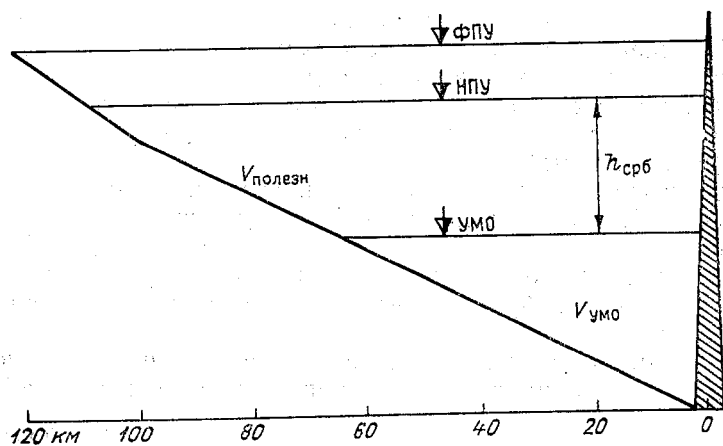


Рис. 4.1. Схематизированный профиль водохранилища.

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.

В последние годы появилось много работ (А. Б. Авакян, В. А. Шаратов, Б. Б. Богословский, Ю. М. Матарзин и др.), в которых с разной степенью детализации рассматриваются вопросы типизации водохранилищ по различным 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 типа водохранилищ яв-

ляется уклон дна и соответствующее увеличение глубин от верховьев к замыкающему створу водохранилища;

— зарегулированные озера (озера-водохранилища). Ложем их служат озерные котловины. Они характеризуются округлой или слабовытянутой формой. Основной отличительной особенностью водохранилищ озерного типа является отсутствие одностороннего уклона дна и сосредоточение наибольших глубин в центральной части котловины;

— водохранилища смешанного типа (озерно-речные), ложем которых служат часть речной долины и озерная котловина. Они характеризуются узким вытянутым приплотинным участком и озеровидным расширением в их центральной части. Основной отличительной особенностью этого типа водохранилищ является хорошо выраженный порог в месте бывшего истока реки из озера;

— наливные водохранилища, создаваемые в естественных понижениях местности, куда по каналам подводятся паводочные и паводочные воды. Такие водохранилища сооружаются большей частью в засушливых районах;

— подземные водохранилища, при создании которых в качестве емкости используются подземные пустоты, например карстовые;

— морские водохранилища на 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. 4.1.

Таблица 4.1

Классификация водохранилищ по размерам (полному объему и площади)

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

В настоящее время в целях дальнейшего изучения динамики водохранилищ и процессов, происходящих в 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 $V_{ср}$ — частное от деления площади водного зеркала F_0 на длину L , максимальная ширина $V_{макс}$ — расстояние по перпендикуляру к длине водоема между наиболее удаленными точками берегов

(без учета глубоко вдающихся в сушу краевых плёсов 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. В долине р. Нил за 4000 лет до нашей эры было создано крупное водохранилище Мерне площадью 2000 км² и объемом 12 км³. Однако до нашего века крупные водохранилища создавались единицами. Полный объем всех водохранилищ планеты, унаследованных от XIX в., составлял 15 км³. Сейчас же объем только Братского водохранилища на р. Ангара составляет 169 км³, 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 30 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. 4.2).

Таблица 4.2

Крупнейшие водохранилища России и зарубежных стран

| Водохранилище | Страна | Река, озеро | Объем, км ³ | | Площадь зеркала, км ² |
|---------------------------|-----------|-------------|------------------------|----------|----------------------------------|
| | | | полный | полезный | |
| ОУЭН-Фолс (1968 г.) | Танзания | Виктория | 205 | 68 | 6900 |
| Мергинсон-Фолс (строится) | » | оз. Альберт | 195 | — | 5300 |
| Братское (1966) | Россия | Ангара | 169 | 48,2 | 5500 |
| 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 |
| Пан Монг (строится) | Лаос | Меконг | 107 | 40 | — |
| 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 | 6450 |

4.2. Виды регулирования стока водохранилищами и их основные характеристики

Регулирование стока — это перераспределение во времени поступающего в водохранилище естественного (бытового) стока реки. По степени перераспределения стока во времени различают суточное, недельное, сезонное, годовичное и многолетнее регулирование и соответственно водохранилища суточного, недельного, годовичного и многолетнего регулирования.

Встречаются также компенсирующее и так называемые 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 рас-

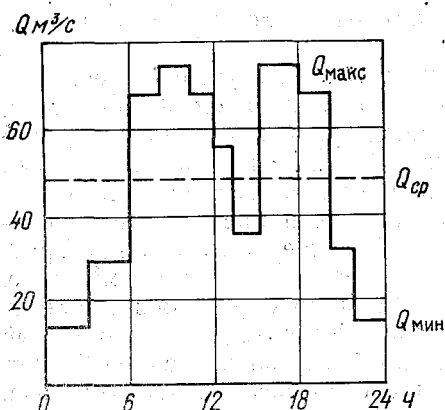


Рис. 4.2. Схема суточного регулирования стока.

ходов в часы утреннего и вечернего максимума за счет снижения водопотребления в ночные и обеденные часы. Схема суточного регулирования стока приведена на рис. 4.2. Данный вид регулирования находит широкое использование в отраслях водоснабжения и энергетики, когда при недостатке воды в источнике позволяет удовлетворить большое 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, который определяется площадью на графике, ограниченной линией естественного расхода и графиком водопотребления в той его части, где расходы водопотребления меньше естественного (постоянного).

Водохранилище недельного регулирования стока предназначено для перераспределения в течение недели практически равномерного стока реки соответственно повышенному водопотреблению в рабочие дни и пониженному — в нерабочие. Схема недельного регулирования стока приведена на рис. 4.3. Объем водохранилища, необходимый для проведения недельного регулирования стока (V), определяется объемом избытков (V_1) в нерабочие дни:

$$V_1 = 86400 (Q_{cp} - Q_2) k \text{ м}^3.$$

Из схемы видно, что за счет разницы в нерабочие дни $(Q_{\text{ср}} - Q_2)k$ среднесуточный расход водопотребления в рабочие дни может быть повышен до величины $Q_1 = Q_{\text{ср}} + (Q_{\text{ср}} - Q_2)k/(n - k)$. Понятно, что превышение дополнительного объема водопотребления над равномерным стоком в рабочие дни $V_2 = 86400(Q_1 - Q_{\text{ср}}(n - k))$ равно объему избытка его в нерабочие дни V_1 . Зная среднее значение водопотребления за неделю (сток за неделю), а именно $Q_{\text{ср}} = [Q_1(n - k) + Q_2k]/n$, и подставляя его в формулы V_1 и V_2 , получаем обобщенную формулу для определения необходимого объема водохранилища для проведения недельного регулирования стока:

$$V = V_1 = V_2 = 86\,400k(Q_1 - Q_2)(n - k)/n \text{ м}^3.$$

В приведенных выражениях n — число дней в неделе, k — число нерабочих дней, Q_1 и Q_2 — расходы водопотребления соответ-

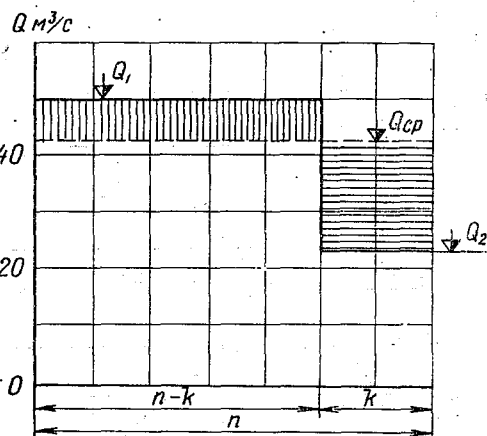


Рис. 4.3. Схема недельного регулирования стока.

n — число дней недели; k — число нерабочих дней.

ственно в рабочие и нерабочие дни при среднем расходе в реке $Q_{\text{ср}}$, 86400 — число секунд в сутках.

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

Сущность сезонного регулирования поясняется на рис. 4.4, где изображены гидрографы естественного (за расчетный маловодный год) и зарегулированного стока, т. е. потребления воды. Для простоты используемый расход воды принят постоянным на протяжении года. На этом же рисунке показан режим верхнего бьефа $Z_{\text{в.б.}}(t)$. Из рисунка видно, что в период, когда естественные расходы больше используемого, водохранилище наполняется, а когда меньше — срабатывается. Полезный объем водохранилища, необходимый для осуществления сезонного регулирования, определяется объемом дефицита стока (разность между используемым расходом и естественными расходами в период межени). На рисунке объем дефицита численно равен площади на гидрографе, ограниченной линией зарегулированного (используемого) расхода

и гидрографом в той его части, где естественные расходы меньше используемых.

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

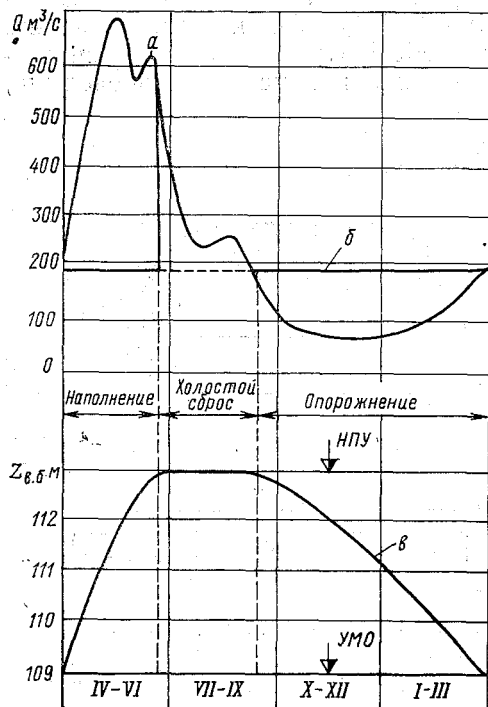


Рис. 4.4. Схема сезонного регулирования стока.

a — естественные расходы воды, b — зарегулированные расходы воды, $в$ — уровни воды верхнего бьефа (водохранилища).

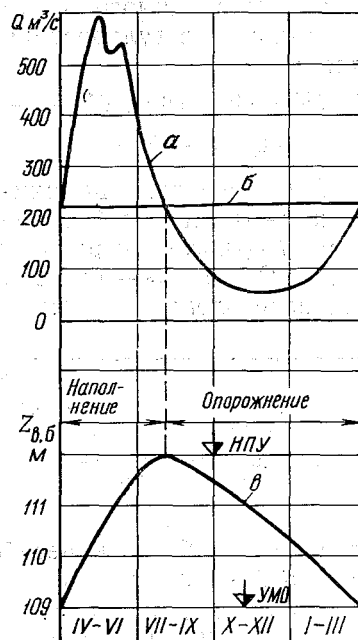


Рис. 4.5. Схема годичного регулирования стока.

Усл. обозначения см. на рис. 4.4.

Объемы превышения стока над потреблением и его дефицита в расчетном маловодном году балансируются только в том случае, когда зарегулированный (используемый) расход воды доведен до среднегодового расхода рассматриваемого года. Такое регулирование стока, при котором наблюдается полное выравнивание стока до среднегодового расхода расчетного маловодного года, называется *годовым* и соответствует теоретическому пределу сезонного регулирования стока. Схема его приведена на рис. 4.5. По соотношению между объемами зарегулированного (используемого) стока $W_{зар} = 31,5 \cdot 10^6 Q_{зар} \text{ м}^3$ и стока расчетного маловодного года $W_{гр} = 31,5 \cdot 10^6 Q_{гр} \text{ м}^3$ можно судить о глубине

сезонного регулирования. Когда $W_{зар}$ приближается к $W_{гр}$, такое регулирование называется *глубоким сезонным*. При малых $W_{зар}$ по отношению к $W_{гр}$ сезонное регулирование может быть названо *неглубоким*. Здесь $Q_{зар}$ — зарегулированный водохранилищем расход воды, $Q_{гр}$ — среднегодовой естественный расход воды в створе гидроузла маловодного года расчетной обеспеченности, $W_{зар}$ и $W_{гр}$ — соответствующие объемы воды зарегулированного и естественного стока. Указанная дифференциация сезонного регулирования имеет существенное значение при расчетах полезного объема водохранилища и разработке правил управления его работой.

Рассмотренные выше примеры сезонного регулирования стока представляют собой наиболее простые случаи однократной работы водохранилища, когда оно в течение водохозяйственного года по одному разу наполняется и срабатывается. При сложном гидрографе притока (при наличии летне-осенних паводков) возможна работа водохранилища в два такта и более. В этом случае потребный для сезонного регулирования объем водохранилища будет зависеть не только от абсолютного значения дефицитов и избытков, но и от взаимного их чередования.

Водохранилище многолетнего регулирования стока предназначено для перераспределения стока не только внутри года, но и из многоводных и средневодных лет и периодов в маловодные (рис. 4.6).

Полезный объем водохранилища многолетнего регулирования стока численно равен объему дефицита стока за маловодное n -летие расчетной обеспеченности, который покрывается за счет многолетних запасов воды, создаваемых в водохранилище за предшествующий маловодному многоводный период. Это наиболее совершенный вид регулирования стока. Необходимость в нем возникает в случае превышения объема зарегулированного стока $W_{зар}$ над стоком расчетного маловодного года $W_{гр}$ заданной обеспеченности p . Многолетнее регулирование следует применять также в случае превышения зарегулированного стока за n лет над стоком расчетного маловодного периода той же длительности. Теоретическим пределом многолетнего регулирования является полное выравнивание стока до среднего многолетнего расхода воды. В этом случае холостые сбросы отсутствуют и при правильной эксплуатации водохранилища весь сток реки, за исключением испарения и фильтрации, может быть полезно использован для народнохозяйственных нужд (выработки электроэнергии, водоснабжения и т. д.). Добиться полного выравнивания стока возможно только ценой больших затрат на сооружение крупнейших водохранилищ, которые с народнохозяйственной точки зрения, как правило, не оправдываются. Однако в ряде случаев при создании водохранилищ на реках, сток которых в многолетнем разрезе выравнен (при относительно малых коэффициентах изменчивости годового стока — $C_{вр}$), иногда экономически целесообразно доведение зарегулированного расхода воды до значения, близкого к среднему многолетнему. Таким образом, полезный

объем водохранилища находится в прямой зависимости от степени регулирования стока. Например, по данным Гидропроекта, для суточного регулирования стока р. Волги в Куйбышевском водохранилище достаточен объем $0,05 \text{ км}^3$, для недельного — $0,5 \text{ км}^3$, для годового — 35 км^3 , а для многолетнего регулирования стока потребовалось бы увеличение объема до 70 км^3 .

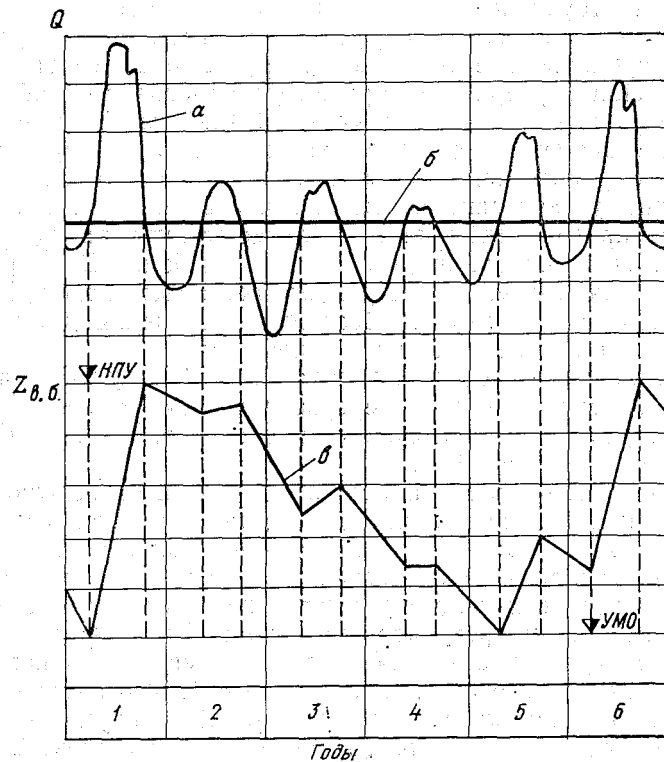


Рис. 4.6. Схема многолетнего регулирования стока.
Усл. обозначения см. на рис. 4.4.

Анализ схем, приведенных на рис. 4.3—4.5, показывает, что если при сезонном регулировании цикл работы водохранилища наполнение — сработка замыкается в пределах одного водохозяйственного года, то при многолетнем регулировании 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* регулирования речного стока.

Компенсирующее регулирование применяется при расположении пункта водозабора или водопользования ниже во-

водохранилища, причем на участке между ними имеется существенный нерегулированный сток. В этом случае водохранилище проектируется на обеспеченное покрытие дефицита между годовым графиком водопотребления и расчетным гидрографом стока с нерегулированного участка. Водохранилище должно так регулировать проходящий через него сток, чтобы с учетом нерегулируемого промежуточного притока можно было получить необходимый режим расходов воды в пункте водозабора.

Вторичное (или повторное) регулирование стока — вид регулирования, который вызывается в основном не режимом стока, а режимом регулирования на находящейся выше по течению водохозяйственной установке, не удовлетворяющим 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, расположенным ниже по течению водозаборами промышленного и сельскохозяйственного назначения и т. п. В таком случае требуется перерегулирование расходов ГЭС. Например, Майнская ГЭС на Енисее. Ее водохранилище выравнивает суточную и недельную неравномерность расходов вышерасположенной Саяно-Шушенской ГЭС и тем самым 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 для лесосплава и в специальных случаях для водного транспорта, а также в санитарных, сельскохозяйственных и рыбохозяйственных целях. Оно осуществляется или специально созданными водохранилищами или обычными, ведущими другие виды регулирования.

Для лесосплава 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 течение нескольких часов, пока дается сосредоточенный попуск из водохранилища; накопление же воды в водохранилище (в отличие от суточного регулирования) производится в течение ряда суток.

Для водного транспорта непериодическое регулирование применяется при необходимости повысить сосредоточенными попусками на некоторое время судоходные глубины на лежащих ниже по течению перекатах. Например, в конце августа 1974 г. из Ленинграда для строящейся Усть-Илимской ГЭС водным путем через северные моря, Енисей и Ангару доставлены два рабочих колеса гидроагрегатов. Ангара в это время мелководна, поэтому

пришлось делать специальные попуски из Братского водохранилища, что обеспечило необходимые для прохода судов глубины.

В санитарных целях кратковременными сосредоточенными попусками пользуются для временного затопления участков реки, зараженных личинками малярийного комара, в целях борьбы с очагами малярии. В последнее время практикуются попуски для регулирования качества речной воды, загрязненной промышленными и бытовыми стоками (р. Харьков, 1970 г.). Такие попуски вследствие разбавления снижают концентрацию минеральных и органических примесей, оказывают положительное влияние на процессы микробиального самоочищения реки и, следовательно, являются эффективным водоохраным мероприятием. В периоды маловодий в низовьях Днестра практикуются попуски воды из Дубоссарского водохранилища для спасения экосистем в обсыхающих плавнях устьевой части реки.

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, Днестра и др.).

Ниже рассматриваются задачи сезонного и многолетнего регулирования стока, требующие для своего решения знания специальных методов расчета. Задачи суточного, недельного и непериодического регулирования в части, касающейся водохранилищ, обычно решаются на основе балансовых расчетов, изложенных выше, а в части, касающейся нижнего бьефа (при суточном и непериодическом регулировании), — на основе расчетов методами неустановившегося режима, изучаемыми в курсе речной гидравлики.

4.3. Экономические и природоохранные условия, определяющие местоположение и параметры водохранилищ

Основные параметры водохранилища выбираются на основе 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 народнохозяйственных объектов.

По экономическим условиям местоположение водохранилищ и их НПУ выбирают исходя из сохранения природного равновесия. Избегают затопления пахотных земель, лесных угодий, заповедных зон и уникальных природных комплексов. Так, на отдаленную перспективу отнесено сооружение таких водохранилищ на Енисее, как Средне-Енисейское и Осиновское, в зону затоплений которых попадают около 70 млн м³ леса и пойменные земли.

Выбор НПУ относится к особо ответственным задачам и производится на основе технико-экономического сопоставления различных вариантов.

Неиспользуемый, или мертвый, объем водохранилища, отвечающий УМО, должен предусматриваться при проектировании водохранилищ как одноцелевого назначения, так и многоцелевого. Он предназначается для обеспечения: минимального объема воды в зоне отдыха; минимального напора воды для выработки электроэнергии; резервного объема для будущего отложения наносов; минимального объема воды для поддержания условий существования рыб и биоценоза; минимальных глубин для навигации; минимального объема воды по условиям ее качества; работы сооружений, отводящих воду из водохранилища (каналов, трубопроводов, наносных 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, живой природы 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 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 отдачу из водохранилища. Таким образом, параметры водохранилища являются взаимосвязанными и выбор их должен осуществляться одновременно.

4.4. Требования различных отраслей хозяйства к уровненным режимам водохранилищ и нижних бьефов гидроузлов

Между компонентами водохозяйственного комплекса, формирующегося при создании водохранилищ многоцелевого назначения, возникают сложные взаимоотношения из-за большого многообразия, несовпадения и нередко противоречивости требований к водным ресурсам реки и режиму эксплуатации водохранилища.

Энергетика заинтересована в кратковременной форсировке уровней водохранилища над НПУ при прохождении половодий и паводков в целях дополнительного снижения максимальных расходов, сбрасываемых в нижний бьеф, и уменьшения или ликвидации холостых (помимо турбин) сбросов. В таком режиме заинтересованы также рыбное хозяйство и отрасли хозяйства, объекты которых при больших расходах затопливаются или подтапливаются на протяжении нижнего бьефа. Против форсировки уровня водохранилища возражают в основном представители сельского хозяйства, поскольку из-за затопления и подтопления земель задерживается сев и снижается урожайность культур на землях, расположенных близко к урезу воды при НПУ. Возражения поступают и от специалистов лесного хозяйства, так как подтопление леса снижает его устойчивость и при наличии ветров наблюдаются значительные его завалы.

Интересы энергетики в период зимней предполоводной сработки водохранилища противостоят требованиям рыбного хозяйства, заинтересованного в минимальной зимней сработке. При глубокой зимней сработке возможно оседание льда на пойму, отчленение от русла местных понижений на пойме, что приведет к нарушению кислородного обмена и гибели рыбы (Новосибирское водохранилище и др.).

Требования к режиму использования накоплений в водохранилище воды также противоречивы. Энергетика заинтересована в использовании большей части ее в осенне-зимний период — период прохождения максимума электропотребления, а водный транспорт требует расходования этих запасов воды для гарантированного навигационного пропуска, обеспечивающего нормальные условия судоходства. Забор воды из водохранилища для целей орошения и обводнения неблагоприятно сказывается на функционировании энергетики и водного транспорта.

Поэтому при проектировании и эксплуатации водохранилищ комплексного назначения необходимо одновременно с регулированием речного стока осуществлять систему мероприятий по переустройству и приспособлению к новым условиям всех отраслей народного хозяйства. При этом следует экономически обосновывать оптимальный режим рыбохозяйственных, сельскохозяйственных и навигационных пропусков в нижний бьеф, режим недельного и суточного регулирования уровней воды в нижнем бьефе, а также целесообразность и эффективность форсировки уровней водохранилища в период пропуска половодий и паводков

и оптимальный режим зимней, предполоводной сработки водохранилища.

Оптимизация режимов эксплуатации водохранилищ является технико-экономической задачей, имеющей своей целью получение максимального эффекта для хозяйства в целом.

4.5. 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. Однако при этом создаваемые искусственно водоемы могут оказывать негативное воздействие на природную среду. В целях повышения хозяйственной эффективности водохранилищ и снижения их негативных последствий необходимо предвидеть механизм этих воздействий на процесс стока и окружающую среду прилегающих территорий.

Воздействия водохранилищ на природные условия условно разделяют на прямые и косвенные.

Прямые воздействия сводятся к следующему. Главным из них является затопление земли, которое полностью исключить не представляется возможным. По данным Гидропроекта к 1991 г. за весь период строительства гидроэлектростанций их водохранилищами затоплено 6,2 млн га земель (0,3 % площади территории бывшего Союза), из них около 2,5 млн га сельскохозяйственных угодий, в том числе лишь около 0,6 млн га пашни. Это конечно, серьезный ущерб. Динамика затопления площадей водохранилищами ГЭС приведена в табл. 4.3. Там же показана динамика во

Таблица 4.3

Динамика затопления площадей водохранилищами ГЭС с 1926 по 1990 г.

| Показатель | 1926—1950 | 1951—1960 | 1961—1970 | 1971—1980 | 1981—1990 (план) |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| Площадь затопления, млн га | 0,709 | 2,609 | 1,913 | 0,913 | 0,329 |
| В том числе: | | | | | |
| леса | 0,397 | 0,852 | 0,877 | 0,483 | 0,203 |
| сельхозугодий | 0,246 | 1,246 | 0,719 | 0,272 | 0,070 |
| Выработка электроэнергии ГЭС, млрд кВт·ч | 9,1 | 42,6 | 69,5 | 83,4 | 59,7 |
| Удельные затопления, га/млн кВт·ч | 78 | 61 | 28 | 11 | 6 |
| В том числе: | | | | | |
| леса | 44 | 20 | 13 | 6 | 3 |
| сельхозугодий | 27 | 29 | 10 | 3 | 1 |

времени объективного показателя затопленной площади на 1 млн кВт·ч выработки электроэнергии ГЭС.

Дополнительное отчуждение земель вызвано подтоплением берегов, которое обусловлено подъемом уровней грунтовых вод

под воздействием подпора уровней в реке. Площадь подтопленных водохранилищами ГЭС земель составила около 1 млн га, в том числе сельхозугодий 0,46 млн га, из них пашни 0,14 млн га.

Вследствие появления больших водных поверхностей значительно усиливаются волновые процессы на водохранилищах. При этом ветровые волны достигают высоты 2—3 м и более, вызывая трансформацию берегов водохранилищ. Указанное явление получило название *переработки берегов*. В результате переработки береговая линия отступает на десятки и сотни метров (водохранилища Волжского и Днепроовского каскадов, Новосибирской ГЭС и т. д.), что приводит к потерям территории. Площадь земель, расположенных в зоне переработки берегов, составляет обычно 3—5 % площади затоплений.

Из-за неправильного выбора подпорных уровней водохранилищ и интенсивного берегообрушения на ряде водохранилищ появляются мелководья. В результате их появления происходят неблагоприятные гидробиологические и гидрохимические процессы, которые влекут за собой цветение воды и в связи с этим ухудшение санитарного состояния водоема. Это положение усугубляется выпуском в водохранилище плохо очищенных сточных вод и резким замедлением водообмена. Так, например, в наиболее крупных зарегулированных речных системах (Волга, Днепр, Енисей, Нарын, Вахш 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. Одним из негативных факторов является и социальный вопрос, связанный с переселением населения. За все время до 1991 г. 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 стороны, требования рыбного хозяйства к режиму уровней водохранилища и стоку из них полностью противоречат тем целям, для которых собственно создается водохранилище.

Создание водохранилищ и сам процесс регулирования речного стока приводят к изменению гидрологического режима в обоих бьефах. Из-за увеличения зеркала водной поверхности резко возрастают потери воды на испарение, что влечет за собой заметное увеличение безвозвратных изъятий воды из реки. Изменяется гидрологический режим в нижнем бьефе гидроузла и тем значительно, чем больше глубина осуществляемого им регулирования стока, под влиянием которого резко повышаются меженные (летние и зимние) расходы воды и снижаются высокие, паводочные и паводочные. Вследствие срезки пиков паводочный и паводков уменьшаются затопления в нижнем бьефе, что приводит к обезвоживанию пойм и их постепенному остепнению. Повышение зим-

них расходов, сбрасываемых в нижний бьеф из глубинных слоев водохранилищ, температура которых более высокая, чем в реке, приводит к образованию полыньи, длина которой нередко достигает нескольких десятков километров (80—100 км 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, зимним зарегулированным расходом воды и метеорологическими условиями (температура воздуха, облачность, туманы и т. д.). Полынья — это фабрика шуги, интенсивное образование которой 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.). Кроме того, изменение температурного режима воды в нижнем бьефе нарушает ледяные переправы, что затрудняет транспортные связи с островами и берегами водотока (Енисей, Обь, Нижняя Тунгуска). Заметное снижение температуры воды в водохранилище летом и осенью по сравнению с температурой воды в реке приводит к более раннему ледоставу, сокращению сроков навигации и изменению фауны.

Вследствие оседания значительной части наносов в водохранилище в нижний бьеф сбрасывается осветленный поток, обладающий повышенной размывающей способностью. Это приводит к интенсивным размывам русла, которые продолжаются длительное время и распространяются на большие расстояния. Деформация русла на протяжении нижнего бьефа усиливается под воздействием проводимого на ГЭС недельного и суточного регулирования мощности в результате которого увеличиваются скорости течения. В связи с размывом русла снижаются уровни в реке как непосредственно ниже гидроузла, так и на значительном расстоянии от него. По опыту эксплуатации многих гидроузлов на реках нашей страны уровни непосредственно у плотины понижались от 0,50 м 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 так полно, как прямые, хотя некоторые формы их проявления уже очевидны сейчас. Так происходит, например, с изменением климата прилегающих территорий, проявляющимся в повышении влажности воздуха и образовании довольно частых туманов, изменениях направления и скорости ветра, уменьшении годовой амплитуды температуры воздуха, т. е. уменьшении континентальности климата в прибрежной зоне 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 худшим. 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 затопляемых при наводнениях. Эффект при этом в сельском хозяйстве в ряде случаев значительно превосходит наносимые ущербы (Токтогульское, Рагунское, Бурейское, Зейское и другие водохранилища).

Нельзя утверждать, что все формы воздействия водохранилищ являются неизбежными и органическими пороками гидротехнического строительства. Многие выявленные из них в процессе создания и эксплуатации водохранилищ явились следствием неправильного проектирования и нарушения установленных правил эксплуатации (рыбное хозяйство, зимние затопления и подтопления, подвижки льда и т. д.).

4.6. Предотвращение неблагоприятных последствий создания водохранилищ

Бороться с главным негативным фактором строительства водохранилищ — затоплением сельскохозяйственных земель можно путем размещения водохранилищ в малонаселенных горных и полугорных 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 электроэнергии ГЭС с 78 га периода 1950-х годов, когда крупные водохранилища ГЭС строились на равнинных реках европейской части страны до 10 га на уровне 1980-х годов. Примерно таким он должен сохраниться и до 2000 г. Что касается сельскохозяйственных подтопленных земель, то они из дальней-

шего использования не исключаются, а могут быть использованы в качестве сенокосов.

Вредные воздействия водохранилищ на рыбное хозяйство удается в значительной мере нейтрализовать правильным проектированием и надлежащим уровнем эксплуатации водохранилищ (строительство рыбоводных заводов, нересто-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 не только наносят минимальный ущерб природе, но одновременно и компенсируют его путем решения острых социальных 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., сколько высокие темпы загрязнения водохранилищ сточными водами промышленных и бытовых объектов, смывом удобрений с непомерно приблизившихся к урезу воды сельскохозяйственных территорий, загрязнением воды транспортными средствами, особенно при перевозке нефтепродуктов, и другими действиями людей. Решение проблемы заключается в первую очередь в организации очистки сточных вод, проведении агротехнических мероприятий и т. п., но очень важно одновременно решение проблем регулирования режима уровней и течений в водохранилищах, организации их промывов, ликвидации мелководий, проведение других гидротехнических мероприятий. Должен быть решен и организационный вопрос о ведомственной принадлежности каждого водохранилища.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы основные предпосылки создания водохранилищ?
2. Назовите типы водохранилищ.
3. Каковы основные параметры водохранилища, определяющие его размеры?
4. Основные виды регулирования стока водохранилищами, их сущность и применение.
5. Назовите основные экономические и природоохранные условия, определяющие местоположение и параметры водохранилищ.
6. Каковы требования различных отраслей хозяйства к уровенным режимам водохранилищ и нижних бьефов гидроузлов?
7. Как влияют водохранилища на природную среду и хозяйство прилегающих территорий?

8. Как меняется гидрологический режим водотока на протяжении верхнего и нижнего бьефов гидроузла?

9. Назовите основные направления и способы уменьшения неблагоприятных последствий создания водохранилищ.

Глава 5

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Водохозяйственное строительство, ведущееся в интересах развития многих отраслей хозяйства, требует огромных капитальных вложений. Очень важно, чтобы эти вложения использовались наиболее эффективно. Поэтому каждое водохозяйственное мероприятие перед его осуществлением должно быть оценено как с технической стороны, так и с экономической.

В практике водного хозяйства различают технико-экономическое обоснование планов водохозяйственных мероприятий и проектов строительства отдельных систем и сооружений. При проектировании одного заранее заданного объекта, например оросительной или осушительной системы, в задачу его обоснования входит выбор лучшего и наиболее экономичного решения только по этому объекту. При планировании водохозяйственных мероприятий необходимо экономически обосновать перспективы развития орошения или осушения и выбрать наиболее эффективные объекты и мероприятия. Обязательным условием высококачественного проектирования является выбор наиболее экономичных проектных вариантов по одному объекту путем сравнения его эффективности в различных вариантах компоновки систем, типов сооружений, способов орошения или осушения, использования мелиорируемых земель и т. д.

Важнейшая задача по обоснованию планов водохозяйственных мероприятий состоит в выборе наиболее экономичных планов-вариантов, т. е. таких объектов работ и мероприятий, которые обеспечивают наиболее полное решение хозяйственных задач при наименьших затратах. В этом случае не только сравниваются между собой различные водохозяйственные объекты и мероприятия, но и сопоставляются с другими возможными вариантами решения тех же задач, например получение дополнительной урожайности сельскохозяйственных культур путем применения удобрений и других агротехнических мероприятий. Выбор проектных и плановых вариантов производят по единой методике на основе использования определенной системы технико-экономических показателей.

Способы расчета экономической эффективности водохозяйственных мероприятий до последнего времени основывались на типовой методике по определению экономической эффективности:

капитальных вложений в отраслях хозяйства. Эта методика рекомендует использовать ряд технико-экономических показателей эффективности капитальных вложений. Наиболее распространенным в практике водохозяйственного проектирования показателем является так называемый *срок окупаемости*, равный периоду, в течение которого вложенные в рассматриваемое мероприятие средства дадут экономический доход в связи с увеличением объема производства при одновременном повышении производительности труда и уменьшении стоимости продукции. При этом «типовая методика» регламентирует предельные нормативные сроки окупаемости, для отдельных отраслей народного хозяйства на уровне 3—7 лет, а для гидротехнических и ряда других объектов допускается возможность их удлинения до 10—12 лет.

Срок окупаемости капитальных вложений на реализацию какого-либо водохозяйственного мероприятия (водохранилища, гидростанции, оросительного сооружения и др.) при определенном наборе оптимальных параметров (емкости, отметки НПУ и т. д.) вычисляется по формуле

$$T = K / (D - I) = K / П \leq T_n,$$

где T — срок окупаемости капитальных вложений; K — общая сумма капитальных вложений; D — доход, I — ежегодные издержки по производству, $П$ — прибыль (чистый доход), T_n — нормативный срок окупаемости.

Например, если в результате создания оросительной системы стоимостью 8 млн рублей на орошаемых землях будет произведено за год сельскохозяйственной продукции на 7 млн рублей при годовых издержках 5 млн рублей, то срок окупаемости получается равным 4 годам, что намного меньше допустимого по нормам десятилетия.

Однако описанная методика применима только в том случае, когда мелиорируются земли, ранее не дававшие вообще никакой продукции. Если же оросительные или осушительные системы создаются на землях, где ранее без мелиорации производилась некоторая продукция, то после введения этих систем получается больше продукции и увеличивается чистый доход, хотя и растут издержки. Прирост продукции связан с увеличением сумм капиталовложений. Поэтому при установлении эффекта от мелиораций следует рассматривать увеличение капиталовложений и приращения издержек на мелиорируемых землях, а срок окупаемости T дополнительных капитальных вложений следует вычислять по формуле $T = (K_1 - K_2) / (I_2 - I_1)$, где K_1 и K_2 — капитальные вложения; I_1 и I_2 — годовые издержки по сравниваемым вариантам с мелиорацией и без нее. Формула позволяет оценить сравнительную эффективность не только двух уровней капитальных вложений, но и разных способов организации водохозяйственных мероприятий. Так, при рассмотрении двух способов подачи воды на орошение — самотеком и при помощи насосов — в качестве

рабочего выбирается тот, который показывает меньший срок окупаемости капитальных вложений, не превышающий допустимые нормативами сроки.

Аналогичные примеры можно привести из области водоснабжения, где приходится сравнивать эффективность обеспечения водой какого-то района за счет создания водохранилища с подводом воды каналом или путем устройства на месте потребления воды артезианских колодцев. Понятно, первоначальные капитальные затраты на создание водохранилища и подводящего канала значительно выше затрат на устройство колодцев. Однако ежегодные издержки по водохранилищу, включающие в себя расходы электроэнергии насосами и их обслуживание, больше эксплуатационных затрат по варианту с водохранилищем. В исполнение принимается тот вариант способа водоснабжения, при котором дополнительные затраты вернутся государству в более короткий период T .

Подобным способом оценивается вариант обеспечения электроэнергией некоторого района за счет постройки гидроэлектростанции или тепловой электростанции. Капитальные вложения по ГЭС выше, а ежегодные издержки ниже, чем по ТЭС. При небольшом сроке окупаемости дополнительных затрат предпочтение будет отдано ГЭС.

В несколько измененном виде вышеприведенная формула для T используется при технико-экономическом обосновании выбираемых параметров водохозяйственной установки. В этом случае в расчет срока окупаемости вместо полных капитальных затрат и ежегодных издержек по вариантам установок вводят их приращения для двух смежных значений параметров, например отметки нормального подпорного уровня, уровня мертвого объема или др., т. е. вместо вышеприведенной формулы используется формула

$$T = (\Delta K_1 - \Delta K_2) / (\Delta I_2 - \Delta I_1).$$

Здесь ΔK_1 и ΔK_2 — приращения капитальных затрат, а ΔI_1 и ΔI_2 — приращения ежегодных издержек для двух вариантов параметра хозяйственной установки.

В приведенных выше соотношениях для расчета срока окупаемости водохозяйственного мероприятия используются абсолютные технико-экономические показатели вариантов мероприятий — капитальные затраты и ежегодные издержки производства. При экономическом анализе и обосновании проектов для сопоставления результатов проектируемых мероприятий с величиной материальных, денежных и трудовых затрат используются относительные, или удельные, показатели, характеризующие капитальные затраты на единицу продукции, производимой водохозяйственной установкой. К ним относятся, например, капитальные затраты на 1 м^3 регулируемого стока, на 1 кВт установленной мощности ГЭС или среднегодовой выработки электроэнергии. Важным удельным технико-экономическим показателем является себестоимость продукции, получаемая делением издержек производства на

объем выпускаемой продукции — годовую отдачу воды из водохранилища или годовую выработку электроэнергии.

Таким образом, для определения технико-экономических показателей водохозяйственных мероприятий необходимо располагать данными о водохозяйственных и водноэнергетических показателях, капитальных затратах и ежегодных издержках. Используемые в приведенных выше зависимостях капитальные затраты K равны сметной стоимости мероприятия, за исключением возвратных сумм, идущих на строительство сооружений, закупку строительных механизмов и после окончания строительства передающихся другим ведомствам. К возвратным суммам относятся также расходы на строительство поселков для строителей, подсобных предприятий, железнодорожных и шоссейных подъездных путей и др.

Ежегодные издержки I включают в себя амортизационные отчисления по сооружению, суммарные эксплуатационные расходы по всем отраслям водохозяйственного комплекса и эксплуатационные расходы по защитным мероприятиям. Амортизационные отчисления учитывают годовой износ оборудования и сооружений и переносятся на стоимость водоотдачи или производимой электроэнергии по существующим нормативам. Эксплуатационные расходы включают в себя сумму выплат по зарплате обслуживающего персонала, на текущий ремонт оборудования и сооружений и др.

Необходимо иметь в виду, что в последние годы, согласно типовой методике по определению экономической эффективности капитальных вложений, в экономических расчетах учитывается фактор времени. Это означает, что приведенные выше соотношения отвечают условиям, когда сравниваемые варианты расчета, в одинаковой мере решающие те или иные хозяйственные задачи, осуществляются в течение одного года и со следующего года может быть получен полный и постоянный по годам эффект.

Поскольку, однако, в большинстве своем крупные мероприятия осуществляются в течение нескольких лет, причем обычно в разные сроки по сравниваемым вариантам, экономические показатели в расчетах рекомендуется (капитальные вложения K , ежегодные издержки I и др.) «приводить» к определенному году, с которого водохозяйственная установка начнет давать полный эффект, т. е. перейдет на нормальный режим эксплуатации.

С момента окончания строительства, когда капитальные вложения прекратятся, до перехода установки на нормальную эксплуатацию проходят разные сроки. Для установок с водохранилищем сезонного регулирования переход на нормальный режим, как правило, может быть осуществлен уже в следующем после окончания строительства году. Для установок с многолетним регулированием стока, подобно, например, Бухтарминской ГЭС, переходный период может длиться несколько лет.

В соответствии с этим экономические показатели в первом случае должны приводиться к году окончания строительства, во

втором — к году, предшествующему переходу на нормальную эксплуатацию. Следовательно, расчетный период «приводки» τ для первого случая будет равен длительности строительства m , а для второго — $m + n$, где n — длительность переходного периода.

Смысл указанного приведения экономических показателей заключается в том, что средства, вложенные в разные годы строительства и эксплуатации установки, будут иметь разную степень «омертвления» и, значит, разную для хозяйства эффективность. Например, затраты первого года строительства начнут давать эффект только через $(\tau - 1)$ год, а последнего — уже на следующий год после истечения периода τ .

Пусть строительство объекта ведется, как указано, m лет, причем из суммарных капитальных вложений K в первый год вкладывается K_1 , во второй K_2 и т. д. Тогда

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_m = \sum_{i=1}^m K_i.$$

Приведенные капитальные вложения, т. е. вложения с учетом замораживания средств в процессе строительства, определяются по формуле сложных процентов:

$$K'_i = K_i (1 + p)^{\tau - i},$$

где K'_i — капитальные вложения i -го года, приведенные к фиксированному году τ ; K_i — фактические капитальные вложения τ -го года; p — коэффициент приведения затрат (или коэффициент учета фактора времени), равный 0,08.

Суммарные приведенные капитальные вложения за весь период строительства можно определить по формуле

$$\sum_{i=1}^{\tau} K'_i = \sum_{i=1}^{\tau} K_i (1 + p)^{\tau - i}.$$

Аналогичным путем могут быть найдены и приведенные ежегодные издержки:

$$I'_i = \Delta I (1 + p)^{\tau - i}.$$

Соответственно суммарные ежегодные издержки за переходный период n (от окончания строительства до перехода на нормальный режим эксплуатации) составят:

$$\sum_{i=m+1}^{\tau} I'_i = \sum_{i=m+1}^{\tau} \Delta I_i (1 + p)^{\tau - i}.$$

Здесь ΔI_i — увеличение издержек в i -й год по сравнению с предыдущим годом, τ — общий период от начала строительства до окончания переходного периода ($m + n$), i — год от начала строительства. Суммирование при этом ведется в интервале лет переходного периода n . Очевидно, для первого года переходного периода под ΔI должны пониматься сами издержки этого года.

Также очевидно, что если переходный период отсутствует ($n = 0$), то

$$\sum_{i=m+1}^{\tau} I'_i = I_{i=m+1}.$$

Учитывая изложенное, при обосновании экономически эффективного варианта осуществления водохозяйственных мероприятий срок окупаемости дополнительных капитальных вложений в более дорогой вариант должен определяться по выражению, отражающему влияние фактора времени:

$$T' = (K'_1 - K'_2)/(I'_2 - I'_1) = T_n.$$

Здесь K' — приведенные суммарные капитальные вложения соответственно в более дорогое (K'_1) и менее дорогое (K'_2) мероприятия; I' — приведенные суммарные ежегодные издержки соответственно в менее дорогое (I'_2) и более дорогое (I'_1) по капитальным вложениям мероприятия; T_n — нормативный срок окупаемости, который, в частности, для гидроэнергетики по типовой методике принят равным 8,3 года. Для гидроэнергетических объектов Крайнего Севера $T_n = 12,5$ года.

В отдельных случаях может оказаться, что по сравниваемым вариантам приведенные капитальные вложения одинаковы. Тогда более эффективным должен быть признан тот вариант, у которого меньше ежегодные издержки или меньше себестоимость выпускаемой продукции — кубометра воды, киловатт-часа электроэнергии и т. п.

При экономических обоснованиях по методу сравнительной эффективности параллельно со сроком окупаемости дополнительных капитальных вложений применяется и другой критерий — коэффициент эффективности капитальных вложений E_n , численно равный обратной величине срока окупаемости, т. е. $E_n = 1/T_n$. Для энергетики E_n равно соответственно 0,12 или 0,08.

Следует отметить, что при сопоставлении нескольких вариантов для обоснования целесообразного с народнохозяйственной точки зрения варианта мероприятий удобнее пользоваться формулой приведенных расчетных затрат:

$$Z' = E_n K' + I'.$$

Значения величин известны из предыдущего.

Оптимальным является вариант, характеризующийся минимальными приведенными расчетными затратами.

В заключение рассмотрим особенности технико-экономического обоснования водохозяйственного строительства при комплексном использовании водных ресурсов. В этом случае водохозяйственная установка удовлетворяет несколько отраслей народного хозяйства. По каждой из них необходимо составить экономические обоснования проектного решения и согласовать их между собою, а также установить экономическую целесообраз-

ность осуществления всего комплекса проектируемых мероприятий в целом. При экономическом обосновании комплексных проектов рассматриваются вопросы компенсации отраслями убытков за счет затопления и других последствий строительства. Сопоставляются различные варианты каждого комплекса для выбора отраслей, входящих в комплекс.

Экономическая эффективность комплексного узла определяется при помощи рассмотренного выше метода сравнения вариантов строительства с учетом капитальных вложений и ежегодных издержек. Гидротехнический узел при этом рассматривается как единое целое.

Затраты на строительство комплексного гидроузла распределяются между отраслями — участниками комплекса с учетом значения решаемой хозяйственной проблемы. Например, при планировании главной задачи — защиты от наводнений одновременно ставятся задачи улучшения условий для работы водного транспорта и для развития энергетики. Первая отрасль вносит капитальные средства с учетом реализации только ее задач, т. е. построения плотины для регулирования паводков. Водный транспорт финансирует строительство шлюзов и обеспечение транспортного освоения водохранилища, к гидроэнергетике относят затраты по постройке ГЭС.

Однако более совершенным следует считать метод распределения комплексных затрат, основанный на принципе равной экономической эффективности капитальных вложений по всем отраслям, входящим в водохозяйственный комплекс. Этот метод предусматривает отнесение большей доли затрат на те отрасли, которые получают наибольший эффект от использования комплексного сооружения, и наоборот. Поэтому экономическая эффективность капитальных вложений по всем отраслям оказывается равной по комплексу в целом.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назовите показатели эффективности капитальных вложений.
2. Что включают в себя ежегодные издержки?
3. В чем заключается смысл приведенных капитальных вложений и ежегодных издержек?
4. Как рассчитывается себестоимость продукции?

Раздел II

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Проектирование водохозяйственных мероприятий представляет собой сложную задачу и ведется в трех основных направлениях: 1) проектирование собственно мероприятий по эффективному использованию водных ресурсов; 2) проектирование сооружений, обеспечивающих осуществление этих мероприятий; 3) проектирование мероприятий, связанных с устранением вредного воздействия гидротехнических сооружений и водохранилищ на существующий режим водотока, условия жизни и хозяйство прилегающих территорий.

Первое из указанных направлений проектирования и составляет круг вопросов, решаемых водохозяйственными расчетами.

Глава 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ЗАДАЧИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

6.1. Задачи водохозяйственных расчетов

Водохозяйственные расчеты связаны с установлением балансовых отношений притока и оттока воды в данном створе и соответствующего им режима сработки — наполнения водохранилища в разные моменты его эксплуатации.

Под водохозяйственными расчетами понимается совокупность расчетов и проектных проработок, включающих в себя следующие основные разделы: выявление ресурсов и режима использования водного объекта, подготовка исходных данных для проектирования; выявление требований водопользователей к водным ресурсам и к режиму регулирования стока; согласование и взаимная увязка этих требований между водопользователями и внутри водопользователей; разработка водохозяйственных балансов рек в створах водоотъемов и проектируемых сооружений; расчеты основных водохозяйственных параметров, определяющих размеры сооружений и водохранилищ (объемы водохра-

нилищ, необходимые для регулирования стока, и соответствующие им подпорные уровни сооружений; размеры водосбросных отверстий и т. п.); выбор методов водохозяйственных расчетов применительно к принятым основным параметрам сооружений и водохранилищ; составление правил управления работой водохранилищ, обеспечивающих реализацию намеченных мероприятий; производство расчетов регулирования стока или водной энергии и составление характеристик режима работы установки или каскада установок; производство ряда специальных расчетов: первоначального наполнения водохранилищ, процесса их заиления, решение оптимизационных задач управления водными ресурсами и т. д.

Водохозяйственные расчеты представляют собой очень важную часть проектирования водохозяйственных мероприятий и поэтому должны быть выполнены с наибольшей тщательностью. Необходимо прежде всего всесторонне изучить режим водотока, выявить влияние на него хозяйственной деятельности и в случае необходимости исключить это влияние.

Необходимо также правильно оценить потребности в воде со стороны всех отраслей хозяйства, удовлетворить запросы которых призваны проектируемые мероприятия; выявить требования к режиму регулирования низкого стока и стока половодий и паводков и т. д. В результате этой части расчетов должны быть построены графики водопользования, относящиеся к водохранилищу и нижнему бьефу гидроузла.

Сопоставлением естественного режима стока с намечаемым режимом его использования определяется характер и масштабы необходимого регулирования стока.

Особое место в системе водохозяйственного расчета занимают исследования пропуска через сооружения высоких половодий и паводков, целью которых является установление возможных максимальных уровней водохранилища и расходов воды, сбрасываемых в нижний бьеф сооружения.

На начальных стадиях проектирования расчеты для обоснования основных параметров сооружений и водохранилищ производятся обобщенными методами по статистическим параметрам исходного гидрологического ряда. Затем при выбранных параметрах производятся подробные балансовые расчеты по всему многолетнему гидрологическому ряду или расчетному его периоду ручным табличным способом или с использованием ЭВМ. Целью их является проверка параметров, рассчитанных обобщенными приемами, а главное — получение характеристик режима работы установки или каскада установок. Указанные расчеты, как при ручном, так и при автоматизированном способе ведутся по специальным правилам, разрабатываемым применительно к выбранным параметрам сооружений и водохранилищ.

При проектировании гидроэлектростанций из общего ряда выделяются расчеты суточного и недельного регулирования мощности ГЭС и режима ее нижнего бьефа.

Создание водохранилищ вызывает определенные негативные последствия, о которых подробно сказано в п. 4.5. Прогноз упомянутых последствий создания водохранилищ и оценка их влияния на условия жизни и хозяйство прибрежных районов является задачей ряда дисциплин, смежных с водохозяйственными расчетами.

6.2. Развитие методики водохозяйственных расчетов

В связи с небольшими масштабами гидротехнического строительства в прошлом водохозяйственные расчеты производились упрощенными приемами, основанными на естественной модели речного стока.

Вместе с развитием в нашей стране гидротехнического строительства, внедрением комплексного подхода к использованию водных ресурсов, а также осуществлением строительства каскадов водохранилищ усложнились расчетные схемы регулирования речного стока. В связи с этим получила развитие методика водохозяйственных расчетов, сформировавшаяся в настоящее время в крупную научно-техническую дисциплину.

Первые так называемые пионерные водохранилища обычно работали обособленно друг от друга и осуществляли, как правило, неглубокое сезонное регулирование речного стока. Расчеты при этом выполнялись простейшими способами, сущность которых заключалась в сопоставлении гидрографов притока и потребления воды в створе гидроузла, образующего водохранилище, и вычисления объемов избытков и недостатков (дефицита) воды. Так возникли методы балансовых расчетов. Такие расчеты производятся способом интегральных кривых в табличной и графической модификациях. В зависимости от степени детализации расчеты могут быть выполнены по данным годовых, сезонных, месячных или декадных значений объемов стока.

Много труда в совершенствование методики балансовых расчетов вложили такие авторы, как М. В. Потапов, Н. В. Мاستицкий, П. А. Ефимович, П. А. Ляличев, С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель, Я. Ф. Плешков, В. А. Бахтиаров и многие другие.

В начале текущего столетия А. Хазен на основе статистической обработки результатов расчетов регулирования стока по общему 300-летнему ряду, составленному из наблюдений по 14 разным рекам, получил расчетный график, связывающий водоотдачу различной обеспеченности с многолетним объемом водохранилища. Расчетный график Хазен построил по кривым продолжительности сработки водохранилища неограниченного объема, что привело к ошибкам в подсчете обеспеченности отдачи.

Устранив ошибки Хазена, Г. И. Иванов в 1939 г. разработал номограммы для расчета многолетнего объема водохранилища путем статистической обработки результатов многолетнего регулирования стока по конкретным гидрологическим рядам 18 рек с общей продолжительностью наблюдаемых данных 1000 лет. В среднем длительность наблюдений по 18 рекам составила 55 лет против 21 года по Хазену. Номограммы Иванова обладают существенными преимуществами: решают задачу в зависимости от коэффициента асимметрии годового стока (C_s); учитывают внутрирядные коррелятивные связи (коэффициент автокорреляции в среднем по 18 рекам равен 0,19); отдача рассмотрена до предельного значения ($\alpha \leq 1,0$).

Главенствующая роль в теории регулирования речного стока принадлежит приемам и методам расчета, базирующимся на использовании обобщенных (вероятностных) стоковых характеристик, полученных по данным натуральных наблюдений за прошедший период времени. Внедрению и широкому развитию методов вероятности и математической статистики в расчетах регулирования стока прежде всего мы обязаны С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю, А. Д. Саваренскому, Я. Ф. Плешкову, Н. А. Картвелишвили, Г. Г. Сванидзе, и др.

В 1935 г. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель предложили метод, основанный на строгом вероятностном расчете регулирования стока путем композиции кри-

вых распределения вероятностей. Сущность метода изложена в гл. 9. Применение метода непосредственно для практических расчетов осложнялось его большой трудоемкостью, в связи с чем Я. Ф. Плешковым были составлены номограммы, которые позволяют определить необходимый многолетний объем водохранилища, если заданы обеспеченность его бесперебойной работы, уровень водопотребления и коэффициент вариации годового стока. Так же легко найти и обеспеченность бесперебойной работы водохранилища при заданном объеме последнего. Применение метода Крицкого — Менкеля 1935 г. ограничено случаем, когда корреляция между объемами стока смежных лет отсутствует или пренебрежимо мала. При этом потери воды на испарение и фильтрацию предполагаются включенными в водоотдачу. Графики Плешкова составлены для постоянного соотношения между коэффициентами асимметрии и вариации ($C_s = 2C_v$). Метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля позволяет определять многолетний объем водохранилища, потребный для многолетнего регулирования стока, и решает задачу на жесткий график водопотребления.

Дальнейший этап исследований в направлении отыскания более совершенной и универсальной методики расчетов регулирования стока завершился опубликованием в 1940 г. работ А. Д. Саваренского, С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

Метод Саваренского, основанный на построении кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища, позволяет получить не только обеспеченность гарантированной отдачи, как это позволяет сделать метод Крицкого и Менкеля 1935 г., но и другие элементы режима водохозяйственной установки — распределение вероятностей наполнений водохранилища, дефицитов, сбросов и т. д. На базе этого предложения разработана еще более совершенная методика расчета регулирования стока по фазам годового цикла, позволяющая, в частности, распространять анализ на нестационарный режим работы водохранилища. Метод Саваренского исходит из известного положения, что наполнение водохранилища в конце какого-то интервала времени равно сумме наполнения в начале его и разности между притоком и стоком из рассматриваемого водохранилища за этот интервал. Расчеты выполняются путем нахождения кривых обеспеченности сумм (наполнений водохранилища на конец расчетного интервала) по заданным кривым обеспеченности слагаемых (стока и отдачи). Критерием законченности расчета является стабилизация формы кривых обеспеченности наполнений водохранилища, т. е. достижение безусловного распределения.

С появлением указанных работ проблема расчета многолетнего регулирования на жесткий график водопотребления была в основном решена. Оставались нерешенными вопросы учета коррелятивной связи между годовым стоком смежных лет, сезонных колебаний стока и коррелятивной связи между стоком за сезоны и задача расчета на сложный график водопотребления.

Используя идею Саваренского (метод 1940 г.), Крицкий и Менкель в работе, опубликованной в 1959 г., решили эти вопросы. Основой расчетов по-прежнему является композиционный метод. По методу 1959 г. И. В. Гуглием разработаны номограммы для определения многолетней составляющей объема водохранилища (1959 и 1964 гг.) с учетом связи между стоком смежных лет при довольно распространенном значении коэффициента автокорреляции 0,3.

При всей строгости рассмотренных выше схем композиционного расчета им, однако, присущи недостатки, сводящиеся к отсутствию законченной математической интерпретации применяемых построений — безусловное распределение вероятностей наполнений водохранилища устанавливается путем последовательного приближения, через условные распределения вероятностей промежуточных лет.

Отечественная методика расчета, основанная на определении координат безусловной кривой распределения вероятностей наполнений, была предложена и получила развитие в работах Н. А. Картвелишвили и др. В этих работах дана общая математическая формулировка задачи по расчетам регулирования стока и намечено ее решение в форме системы уравнений, определяющих координаты безусловной кривой распределения вероятностей наполнений. В отличие от зарубежных авторов, Картвелишвили, не ограничиваясь случаем статистически независимых колебаний стока, разработал теорию расчета, позволяющую учитывать группировки лет различной водности. Связь между стоком за смежные

годы вводится в расчет в виде так называемой функции перехода. Система линейных уравнений преобразуется при этом в систему квадратных уравнений, решение которых может быть получено либо путем последовательного приближения, либо с помощью вычислительных машин.

Непосредственное использование этого метода в практических расчетах в настоящее время затрудняется его большой сложностью и высокой трудоемкостью.

В начале 60-х годов, с появлением ЭВМ, к расчетам регулирования стока стал применяться метод статистических испытаний — метод Монте-Карло. Формированию этого метода в области моделирования гидрологических рядов и регулирования стока посвящены работы Морана (1959 г.), Г. Г. Сванидзе (1964 г.), А. Ш. Резниковского (1969 г.) и др.

Моделирование длительного ряда выполняется так, чтобы статистические параметры (Q , C_v , C_s , r_1) исходного и нового рядов были одинаковыми. В результате исходный ограниченный ряд стока сам оказывается как бы одним из вариантов рядов, получаемых методом Монте-Карло. Хотя репрезентативность обоих рядов одинакова (по статистическим параметрам), искусственный ряд, например в 1000 лет, позволяет обнаружить большое число сочетаний стока, возможных для параметров исходного ряда. Моделированный ряд используется лишь как весьма расширенная информация о стоке, имеющая те же фактические параметры стока и служащая для надежного выявления различных их сочетаний. При этом выводы по регулированию стока более надежны, чем по исходному гидрологическому ряду.

На основе расчета по методу Монте-Карло Г. Г. Сванидзе построил графики для определения многолетней составляющей объема водохранилища при разных коэффициентах r_1 ($r_1 = 0,0; 0,1; 0,3; \dots; 0,6$) и при различных соотношениях между коэффициентами асимметрии C_s и вариации C_v ($C_s/C_v = 1 \dots 4$). Одновременно им были даны рекомендации по учету внутрigoдового распределения стока для получения всего полезного объема водохранилища. Сезонная составляющая объема водохранилища может быть определена обычным путем. Аналогичные номограммы для определения многолетнего объема водохранилища были разработаны в Энергосетьпроекте под руководством А. Ш. Резниковского.

Интересные исследования по разработке новых приемов расчета регулирования стока проведены Ш. Ч. Чокиным, В. П. Захаровым, В. А. Киктенко и др.

Из зарубежных исследователей вероятностных методов расчета регулирования стока следует также отметить Ланга, Дхир, Ахуджа и Каришнамурти, Фати и Шукри и др.

Все рассмотренные методы и приемы расчета многолетнего регулирования стока наиболее разработаны применительно к системам, состоящим из одного водохранилища. Более поздние попытки распространить те или иные из указанных методов на случай хотя бы двух водохранилищ, как правило, не были осуществлены в проектной практике из-за вычислительной сложности и фактической невозможности учета многообразия требований различных участников водохозяйственного комплекса к регулированию стока рек в водохранилищах. Поэтому во всех сложных случаях регулирования стока (многоступенчатые каскады водохранилищ и несколько участков водохозяйственного комплекса) в проектной практике до последнего времени использовался только календарный метод расчета. Использование календарного ряда в качестве гидрологической основы расчетов регулирования стока ставило под сомнение расчетные значения отдачи водохранилища многолетнего регулирования стока. Практическое решение рассматриваемой задачи в простых и сложных случаях регулирования стока дает применение рассмотренного выше метода Монте-Карло.

Параллельно с методикой регулирования стока развивались и другие области водохозяйственных расчетов, а именно методы водноэнергетических расчетов и методы управления работой водохранилищ, которые изложены в соответствующих главах учебника.

Методы водохозяйственных и водноэнергетических расчетов, а также приемы управления работой водохранилищ наиболее полно отражены в работах С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, В. А. Бахтиарова, Я. Ф. Плешкова, Ш. Ч. Чокина, А. Е. Асарина и некоторых других приведенных в списке литературы.

В настоящем учебнике подробно изложены методы С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, метод статистических испытаний, а также номограммы к ним

(Я. Ф. Плешкова, И. В. Гуглия, Энергосетьпроект), нашедшие широкое применение в практике водохозяйственного проектирования и отраженные в программе курса.

6.3. Расчетная обеспеченность водопользования различными отраслями хозяйства и учет ее в водохозяйственных расчетах

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 водоподачи полностью не решается. Для полного регулирования речного стока потребовались бы огромные объемы водохранилищ, создание которых не может быть оправданно. 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:

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

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_l , бесперебойных периодов (месяцев, декад, суток) — p_n или числом часов бесперебойной подачи потребителю воды или энергии — p_0 . При этом $p_l = m/(n + 1)$; $p_n = m/n$; $p_0 = (W_{\text{гар}} - \overline{\Delta d})/W_{\text{гар}} = (N_{\text{гар}} - \overline{\Delta d})/N_{\text{гар}}$. Здесь m — число бесперебойных лет или периодов; n — общее число членов ряда; $N_{\text{гар}}$ — гарантированная мощность ГЭС; $W_{\text{гар}}$ — гарантированная водоотдача гидроузла; $\overline{\Delta d}$ — средний многолетний дефицит энерго- или водоотдачи. Четкой связи между показателями обеспеченности нет, однако можно указать, что $p_l < p_n < p_0$. Так, для примера в табл. 6.1 показана связь

Таблица 6.1

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 |

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.

Обычно расчетная обеспеченность определяется выраженным в процентах числом бесперебойных лет. Это наиболее понятный и достаточно гибкий критерий надежности водоподачи.

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. 6.2 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 % при объеме

Таблица 6.2

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

| Обеспеченность p % | $\beta = V_{\text{полезн}}/\bar{W}_r$ | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------------------------|------|------|------|---|------|------|------|------|---|
| | 0,05 | | | | | 0,15 | | | | |
| 99 | 1 | | | | | 1 | | | | |
| 95 | 1,30 | 1 | | | | 1,21 | 1 | | | |
| 90 | 1,37 | 1,06 | 1 | | | 1,29 | 1,06 | 1 | | |
| 75 | 1,65 | 1,26 | 1,20 | 1 | | 1,49 | 1,23 | 1,16 | 1 | |
| 50 | 1,90 | 1,46 | 1,39 | 1,15 | 1 | 1,68 | 1,39 | 1,30 | 1,12 | 1 |

водохранилища $\beta = 0,15$, можно получить приращение отдачи более чем на 20 %.

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. Менкеля:

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

где p_1 и p_2 — обеспеченности соответственно нормальной α_1 и урезанной α_2 водоотдачи (α — 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 переломные годы, приведет к увеличению многолетней составляющей полезного объема водохранилища и соответственно к увеличению его полного объема.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Каковы задачи водохозяйственных расчетов?
2. Назовите основные этапы развития методики расчетов регулирования речного стока.
3. Как понимаете обеспеченность водоотдачи из водохранилищ?
4. Как связаны между собой понятия расчетная обеспеченность и гарантированная отдача?
5. Что такое приведенная обеспеченность?

Глава 7

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

7.1. 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.

Требования к полноте исходных данных в основном диктуются масштабами намечаемого регулирования стока, размерами создаваемого подпора, размещением других ступеней в схеме использования водотока, ожидаемыми русловыми процессами и т. д.

Точность и степень подробности исходной информации определяется также стадией проектирования. В нашей стране принято, как правило, трехстадийное проектирование: обосновывающие материалы (технико-экономическое обоснование), проект и рабочие чертежи. На первой стадии проектирования обязательному рассмотрению подлежит схема использования водных ресурсов водотока и его притоков.

7.2. Гидрологическая информация и способы ее использования

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. Проектирование 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, имеющей вид (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Среднемесячные и среднегодовые расходы воды реки
в створе м³/с

| Водохозяйственный год | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | I | II | III | Средне- годовой 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 |

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. 7.1 вводятся дополнительные графы.

Проведение расчетов только по месячным интервалам дают удовлетворительные результаты лишь для ГЭС с водохранилищами годового и многолетнего регулирования стока. Применение суточных интервалов оправдано только для ГЭС с водохранилищами суточного регулирования и с низким коэффициентом использования стока. Использование расчетных интервалов больше чем месяц приводит, по мнению Гидропроекта, к существенному завышению расчетной водо- или энергоотдачи, что является крайне нежелательным. При этом обычно используется не календарный год с января по декабрь, а водохозяйственный (как правило, с начала половодья до конца межени). Практический смысл такого года заключается в том, что в его пределах замыкается определенный этап работы водохранилища: наполнение — сработка.

Граница водохозяйственного года совмещается, как правило, с началом первого половодного месяца. Хотя от года к году время наступления половодья календарно 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:

- средний многолетний годовой сток ($\bar{Q}_г$ или $\bar{W}_г$);
- распределение стока в течение года (по сезонам, отдельным периодам, в течение месяца, суток);
- максимальные расходы воды:
 - а) сформированные весенним снеготаянием (максимумы весеннего половодья);
 - б) сформированные ливневыми осадками (максимумы дождевых паводков);
 - в) сформированные в результате обоих факторов (весеннее снеготаяние и ливневые осадки);
 - г) различной обеспеченности;
- объем стока весеннего половодья и дождевых паводков;
- минимальные расходы;
- среднегодовой расход взвешенных и донных наносов;
- распределение расходов взвешенных и донных наносов в течение года;
- 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 проверить 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 их наличии 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. наблюденный 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 поступления в реку возвратных вод. Аналогично восстанавливается

естественный сток и в случае территориального перераспределения стока из одной речной 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, орошения и т. п., а восстановление его, т. е. приведение к естественным условиям, становится все сложнее. В восстановленные ряды вносится дополнительная 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. Накопленные материалы исследований показывают, 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 наблюденного 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 на-

копления данных наблюдений за стоком, например через каждые 3—5 лет, гидрологические, водохозяйственные и водноэнергетические расчеты следует проводить вновь и уточнять статистические параметры годового и сезонного стока, гарантированную водо- и энергоотдачу строящихся и эксплуатируемых водохранилищ и гидроузлов.

В настоящее время бóльшая часть климатологов мира считает безусловным повышение температуры воздуха в результате «парникового эффекта». Это потепление, по некоторым оценкам, выразится в повышении среднегодовой температуры воздуха на 1 °С к 2000 г. и на 2 °С к 2020 г. В результате повышения температуры воздуха ожидаются существенные изменения элементов водного баланса и, по-видимому, поверхностного (речного) стока. Поэтому при прогнозировании будущего режима стока желательно представить себе изменение условий его формирования вследствие этого фактора и внести соответствующие поправки.

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 в смысле 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}_r или \bar{W}_r , $C_{ог}$, $C_{ст}$, r_1), 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 общее с двумя вышеотмеченными способами использования гидрологических данных в выполняемых водохозяйственных расчетах. Общим с первым яв-

ляется 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 способом. 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 отдачи водохранилищ практически всегда с необходимой точностью можно выполнить непосредственно по ряду наблюдений, если его длина составляет не менее 25—30 лет (первый способ). 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 способ, т. е. с использованием кривых распределения вероятностей стока или непосредственных гидрологических рядов, смоделированных по методу Монте-Карло.

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

7.3. Особенности подготовки исходных гидрологических данных при использовании естественного водоема (озера) под водохранилище

Если в водохранилище превращается озерный водоем путем создания подпора плотиной, сооружаемой в истоке реки, вытекающей из озера, или на некотором расстоянии от него, то водо-

хозяйственные 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. 7.2) 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; $\Delta V = \Delta Z F_{\text{ср}}$ — объем положительной или отрицательной аккумуляции, т. е. объем воды, задержанной в озере или сработанной из него; ΔZ — изменение уровня озера за расчетный интервал времени Δt , $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$ (Z_i и Z_{i+1} — уровни озера на начало и конец Δt); $F_{\text{ср}}$ — 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 7.2

Подсчет расходов притока в водохранилище

| Расчетный интервал времени Δt | $Q_{\text{ст}}, \text{ м}^3/\text{с}$ | $Z \text{ м}$ | | $\Delta Z \text{ м}$ | $F_{\text{ср}} \text{ км}^2$ | $\Delta V \cdot 10^6 \text{ м}^3$ | $\frac{\Delta V}{\Delta t} \text{ м}^3/\text{с}$ | $Q_{\text{пр}} \text{ м}^3/\text{с}$ |
|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|
| | | на конец интервала | на середину интервала | | | | | |
| IV | 857 | 1,06 | 1,12 | 0,13 | 1950 | 254 | 98 | 955 |
| V | 1970 | 1,19 | 1,48 | 0,58 | 2090 | 1215 | 462 | 2432 |
| VI | 1400 | 1,77 | 2,22 | 0,90 | 2350 | 2120 | 806 | 2206 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Естественные водоемы (озера) в настоящее время широко используются для нужд орошения и водоснабжения. Для расчета степени снижения расходов воды в истоке вытекающей из озера реки при заборе воды из озера на эти нужды необходимо учитывать его регулируемую способность. С учетом этого снижение расходов воды в истоке не будет равно забираемому из озера расходу. Для проведения подобных расчетов необходимы следующие исходные данные: график водопотребления (режим забора воды из озера); расходы притока воды в озеро; зависимость объемов озера от уровней — $V = f(Z)$; кривая пропускной способности истока — $Q = f(Z)$. Предположим, что на начало Δt известны уровень озера Z_0 и соответствующий ему объем озера V_0 , а также расход забора воды Q_1 . Объем забора за Δt составит $\Delta V_1 = Q_1 \Delta t$. Наполнение озера на конец Δt : $V_t = V_0 - \Delta V_1$. По V_t с кривой $V = f(Z)$ снимаем Z_t ,

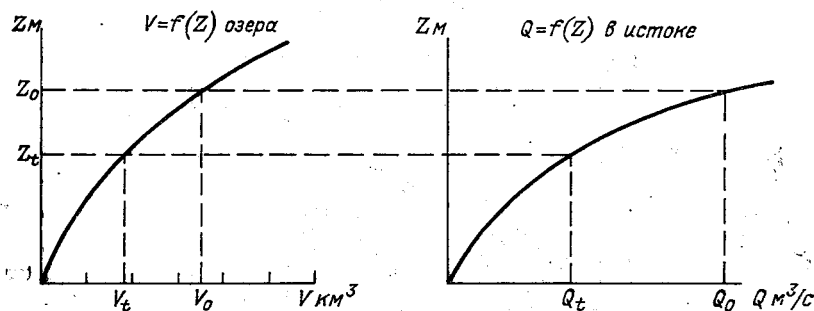


Рис. 7.1. Схема расчета расходов воды в истоке реки, вытекающей из озера, при заборе из него воды на народнохозяйственные нужды.

а по Z_t с кривой $Q = f(Z)$ в истоке — Q_t в истоке. Естественно, что разность расходов в истоке ($Q_0 - Q_t$) не будет соответствовать расходу Q_t . Аналогичным приемом рассчитывается проектный гидрограф в истоке при использовании озера для различных народнохозяйственных целей с учетом его естественной регулирующей способности. Схема расчета приведена на рис. 7.1.

7.4. 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 . Соединяя эти точки

прямой, можно построить зависимость $F = f(Z)$, изображенную в виде ломаной линии на рис. 7.2. Ординаты кривой $V = f(Z)$ для любой отметки Z рассчитываются путем последовательного суммирования от Z_0 элементарных объемов ΔV_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 ΔZ

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

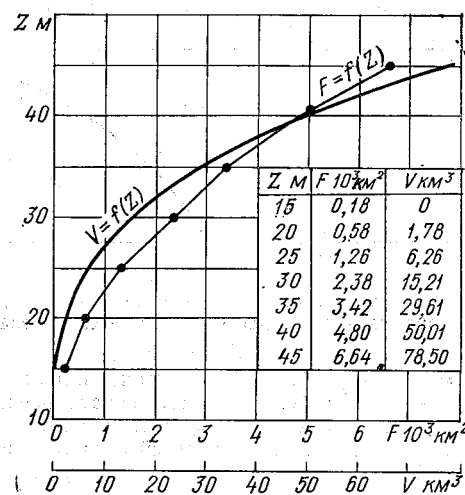


Рис. 7.2. Кривые площадей зеркала (F) и статических объемов (V) водохранилища.

где ΔV_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} ; $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$.

Расчет топографических характеристик водохранилища удобно вести по форме табл. 7.3.

Из табл. 7.3 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 км³, т. е. разница составила около 1,0 %.

По данным таблицы строят зависимости $F = f(Z)$ и $V = f(Z)$ (см. рис. 7.2). Форма кривой $F = f(Z)$ определяется конфигурацией долины и может иметь неправильное очертание. Зависимость $V = f(Z)$ выражается плавной выпуклой кривой параболического вида.

Таблица 7.3

Расчет топографических характеристик водохранилища

| Уровень воды Z м | Площадь зеркала воды F км ² | $F_i + F_{i+1}$ | $F_i + \sqrt{F_i + F_{i+1}} + F_{i+1}$ | Высота слоя воды ΔZ м | Объем слоя воды ΔV_i км ³ | Объем водохранилища $V = \sum \Delta V_i$ км ³ |
|--------------------|--|----------------------|--|-------------------------------|--|---|
| | | 2 км ² | 3 км ² | | | |
| 15 | 175 | 375 | 356 | 5 | 1,78 | 0 |
| 20 | 575 | 918 | 895 | 5 | 4,48 | 1,78 |
| 25 | 1 260 | 1 820 | 1 790 | 5 | 8,95 | 6,26 |
| 30 | 2 380 | 2 900 | 2 880 | 5 | 14,4 | 15,21 |
| 35 | 3 420 | 4 110 | 4 090 | 5 | 20,4 | 29,61 |
| 40 | 4 800 | 5 720 | 5 700 | 5 | 28,5 | 50,01 |
| 45 | 6 640 | 7 970 | 7 930 | 5 | 39,6 | 78,51 |
| 50 | 9 300 | 10 550 | 10 530 | 5 | 52,6 | 118,11 |
| 55 | 11 800 | | | | | 170,1 |

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 (см. п. 15.2).

7.5. 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 года; 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 водоподачи 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 в настоящее время трудно сделать какие-либо обобщения по этому поводу. Рассматривая современную практику осуществления весенних рыбохозяйственных и (или) сельскохозяйственных попусков из водохранилищ Цимлянского, Волгоградского и Бухтарминского гидроузлов, отметим, что объем и гидрограф таких попусков определяется объемом имеющейся в водохранилище воды на начало осуществления попуска и прогностическим притоком воды за период половодья. В зависимости от сочетания этих двух предикторов выбирается определенная градация попуска (их всего пять) со своим объемом и гидрографом. Минимально допустимый расход воды в нижний бьеф проектируемого Катунского гидроузла на р. Катунь был определен в летние месяцы (май — август) в $500 \text{ м}^3/\text{с}$, т. е. равным минимальному естественному среднемесячному расходу воды за этот период. Такой подход вызывает сомнения, и правильнее, по мнению А. Е. Асарина, экологические попуски в нижние бьефы принимать равными минимальным расходам в среднем за рассматриваемые периоды (сезоны).

7.6. 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 E_d физически представляет собой разность между естественным стоком с намечаемой к затоплению суши y_c и стоком с зеркала водохранилища y_b . При этом y_b определяется разностью между осадками x , выпавшими на водное зеркало, и испарением с водной поверхности E_b , т. е. $y_b = x - E_b$. Таким образом, слой дополнительного испарения $E_d = y_c - y_b$.

Подставив вместо y_b его значение $(x - E_b)$ и сделав некоторую перестановку, получим

$$E_d = y_c - (x - E_b) = E_b - (x - y_c).$$

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

$$E_d = E_b - E_c.$$

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

$$E_d = E_b - x.$$

Все величины в формулах выражаются в миллиметрах слоя.

Средний за интервал времени Δt_i расход потерь воды на дополнительное испарение $\bar{Q}_{ni}(t)$ в $\text{м}^3/\text{с}$:

$$\bar{Q}_{ni} = E_{di} \bar{F}_i / (1000 \Delta t_i).$$

Здесь \bar{Q}_{ni} — расход потерь воды на дополнительное испарение за Δt_i , $\text{м}^3/\text{с}$; E_{di} — слой потерь на дополнительное испарение в течение расчетного интервала времени Δt_i , мм; \bar{F}_i — средняя площадь водохранилища, м^2 ; 1000 — число для перевода слоя из миллиметров в метры. В общем случае \bar{F}_i представляет собой разность площадей водного зеркала после постройки водохранилища \bar{F}_{bi} и до постройки F_{ci} :

$$\bar{F}_i = \bar{F}_{bi} - F_{ci}.$$

Так как величина F_{ci} относительно мала, то в проектных расчетах ее принимают равной нулю, а \bar{F}_i определяют по зависимости $F = \bar{F}_b = f(Z)$ при уровне, отвечающем среднему наполнению водохранилища за расчетный интервал времени Δt_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.

В ручных водохозяйственных расчетах определение потерь воды на дополнительное испарение удобно производить по предварительно разработанной зависимости $Q_{ni} = f(F)$ или $Q_{ni} = f(V)$. Пример такой зависимости дан на рис. 7.3. При создании водохранилищ в узководственных 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. Потери на дополнительное испарение изменяются в широком диапазоне — от 0 для северных районов до 10% среднего многолетнего стока реки для южных районов.

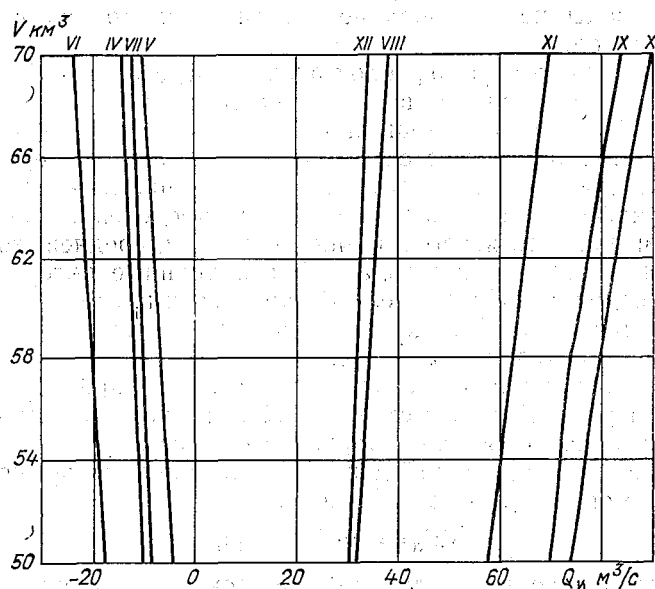


Рис. 7.3. Зависимость потерь воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилища (Q_n) от его наполнения (V).

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 зависимостям, известным из гидравлики. В основном Q_f — это фильтрация через земляные плотины. Так, на Камской ГЭС $Q_f = 15$ м³/с, на Цимлянской $Q_f = 20$ м³/с, а на Саратовской $Q_f = 70$ м³/с. В то же время для Красноярской бетонной плотины $Q_f = 6$ м³/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 $Q_{шл}$. Средний расход потерь воды на шлюзо-

вание $Q_{шл}$ за интервал времени Δt определяется по заданному числу шлюзований m , площади водной поверхности одной шлюзовой камеры S и режиму уровней бьефов (для однопунктного и однокамерного шлюза). В этом случае, приняв в расчете средние отметки бьефов, можно найти $Q_{шл}(t)$ по формуле

$$Q_{шл} = mS(\bar{Z}_{в.б} - \bar{Z}_{н.б})/\Delta t,$$

где $Q_{шл}$ — потери на шлюзование, м³/с; S в квадратных метрах, $\bar{Z}_{в.б}$ и $\bar{Z}_{н.б}$ в метрах, Δt 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 1—2-ю декады в начале половодья. Отсюда и двухзначность 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 $\Delta W_{л}$, подлежащий исключению из зимнего притока, можно определить по выражению

$$\Delta W_{л} = h\gamma(F_{н} - F_{к}),$$

где h — средняя толщина ледяного покрова водохранилища, γ — плотность льда, $F_{н}$ и $F_{к}$ — начальная (в момент образования ледостава) и конечная (в момент окончания зимней сработки) площади зеркала водохранилища.

Величина $\Delta W_{л}$ 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 — соответственно 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:

зимой

$$\Delta W_{э} = \Delta W_{л} - \Delta W_{с};$$

весной

$$\Delta W_{\text{в}} = -\Delta W_{\text{л}} + \Delta W_{\text{с}},$$

где $\Delta W_{\text{с}} = h_{\text{с}} F_{\text{к}}$. Здесь $\Delta W_{\text{с}}$ — объем «снегового притока», $h_{\text{с}}$ — слой воды в снеговых осадках, $F_{\text{к}}$ — 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 поэтому 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 Δt расход потерь воды на ледообразование $Q_{\text{л}}(t)$ (в $\text{м}^3/\text{с}$) может быть определен по выражению

$$Q_{\text{л}} = (\Delta W_{\text{л}} - \Delta W_{\text{с}}) / \Delta t.$$

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 Δt в формуле будет соответствовать периоду сработки водохранилища.

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 водоема (озера) под водохранилище?
4. Назовите способы использования данных гидрологических наблюдений в водохозяйственных расчетах. Их достоинства и недостатки.
5. Какие необходимы топографические материалы и в чем заключается их обработка?
6. Какие необходимы другие исходные материалы и как они используются в проекте водного хозяйства?
7. В чем заключается физическая природа потерь воды из водохранилища и методы их определения?

РАСЧЕТЫ СЕЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩАМИ

Физический смысл сезонного (годового) регулирования стока изложен в п. 4.2. Здесь следует указать пределы изменения гарантированного (зарегулированного) расхода воды нормируемой обеспеченности $Q_{\text{гар}}$ при сезонном регулировании стока: $Q_{\text{мин}} \leq Q_{\text{гар}} \leq Q_{\text{гр}}$ или в относительных единицах $K_{\text{мин}} \leq \alpha \leq K_{\text{гр}}$. Здесь $Q_{\text{гар}}$ — минимальная среднегодовая отдача из водохранилища, обеспечиваемая с заданной надежностью; $Q_{\text{гр}}$ — среднегодовой расход воды маловодного года расчетной обеспеченности p ; $Q_{\text{мин}}$ — минимальный наблюдаемый расход воды, для обеспечения которого не требуется создания объема водохранилища ($V_{\text{полезн}} = 0$); α — гарантированный расход в долях среднегодового расхода воды за многолетие (нормы годового расхода), т. е. $\alpha = Q_{\text{гар}}/Q_{\text{г}}$; $K_{\text{гр}}$ — модульный коэффициент годового стока расчетной обеспеченности: $K_{\text{гр}} = Q_{\text{гр}}/Q_{\text{г}}$; $K_{\text{мин}} = Q_{\text{мин}}/Q_{\text{г}}$.

При расчетах регулирования стока обычно приходится решать следующие основные задачи:

- 1) определить полезный объем водохранилища $V_{\text{полезн}}$, необходимый для поддержания заданного зарегулированного (гарантированного) расхода воды $Q_{\text{гар}}$;
- 2) определить гарантированный расход воды $Q_{\text{гар}}$, обеспечиваемый заданным полезным объемом $V_{\text{полезн}}$;
- 3) построить график связи между $Q_{\text{гар}}$ и $V_{\text{полезн}}$.

Указанные задачи решаются балансовыми расчетами по календарным гидрологическим рядам или их периодам, а также применительно к сезонному (годовому) регулированию стока — по нескольким моделям маловодных лет.

8.1. 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 модификации. 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 внутривременные корреляционные связи.

Интегральные кривые — это графическое изображение хронологической последовательности стока или потребления в нарастающем виде, используются как один из приемов расчета регули-

рования 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 монографиях В. А. Бахтиарова и Я. Ф. Плешкова. Исходными данными для подсчета интегральной (суммарной) кривой стока служат среднеинтервальные расходы воды за наблюдаемый гидрологический ряд или его период водохозяйственных лет. Абсолютное значение стока за принятый (постоянный) интервал времени Δt равно произведению среднеинтервального расхода Q_i на число секунд в принятом интервале времени, т. е. $\Delta W_i = Q_i \Delta t$.

При этом суммарный сток $W = \sum_0^t Q_i \Delta t = \Delta t \sum_0^t Q_i$. Вид такой сум-

марной кривой в прямоугольных координатах (W, t) дан на рис. 8.1 а. Из способа построения суммарной (интегральной) кривой вытекают следующие ее свойства: каждая ордината интегральной кривой представляет собой суммарный сток от начала построения до данного момента времени, а разность их — сток за интервал времени между ними; при постоянном расходе воды интегральная кривая представляет собой прямую линию. Поэтому, если сток задан в виде ступенек, интегральная кривая будет представлена ломаной линией; из рис. 8.1 а следует, что тангенс угла наклона α к оси абсцисс линии, секущей интегральную кривую, есть средний расход воды в интервале Δt : $\operatorname{tg} \alpha = BC/AC = \Delta W/\Delta t = \bar{Q}$. При этом тангенс угла наклона α' касательной к точке A ($\operatorname{tg} \alpha' = dW/dt = Q$) представляет собой расход в точке. Необходимо учитывать, что интегральные кривые строятся в координатах численно неодинаковых масштабов. Обозначим масштаб объемов через m_w , а масштаб времени — m_t . Тогда по рис. 8.1 а длины отрезков BC и AC составят: $BC = \Delta W/m_w$ и $AC = \Delta t/m_t$. Подставив эти значения, получим $\operatorname{tg} \alpha = (\Delta W/m_w)/(\Delta t/m_t) = Q/(m_t/m_w)$. Отсюда $Q = \operatorname{tg} \alpha (m_w/m_t)$. Таким образом, чтобы определить расход воды по интегральной кривой, необходимо измерить соответствующий тангенс угла наклона секущей или касательной и умножить его на отношение масштабов объемов и времени, что представляет неудобство. Поэтому в практических расчетах пользуются специальным графиком, называемым *лучевым масштабом*. Данный график позволяет по наклону секущей или касательной определить расход воды. Суть его видна из рис. 8.1 а. В свободном месте проводится горизонтальный отрезок $OM = l$, а через точку M — вертикальная линия. Через точку O проводим линию ON , параллельную AB , получаем треугольник ONM , подобный треугольнику ABC . Из их

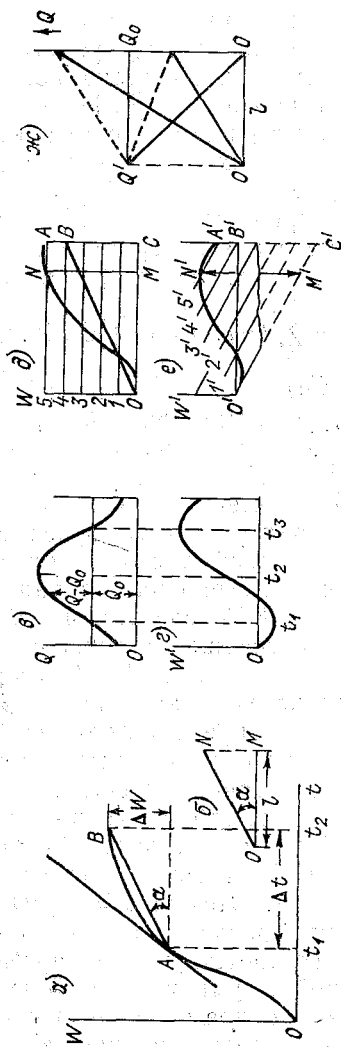


Рис. 8.1. Суммарная кривая (а) и лучевой масштаб (б), гидрограф (в), разностная интегральная кривая (г), интегральные кривые в прямоугольных (д) и косоугольных (е) координатах и лучевой масштаб (ж).

подобия следует, что $NM/l = BC/AC = \Delta W/\Delta t = Q$, т. е. $NM = lQ$ или $NM = l \operatorname{tg} \alpha$. Следовательно, на вертикальной линии отсекается отрезок NM , пропорциональный Q . Поэтому вертикальная линия есть шкала расходов, а рис. 8.1 б в целом — лучевой масштаб. Точка O называется *полюсом лучевого масштаба*, а отрезок l — *полюсным расстоянием*. Чтобы построить такой лучевой масштаб, необходимо задаться удобным масштабом шкалы расходов воды m_Q и определить l . Имея в виду выражение $\operatorname{tg} \alpha$, $NM = l \operatorname{tg} \alpha$ перепишем в виде $Q/m_Q = l(m_i/m_w)Q$, а $l = m_w/(m_i m_Q)$.

Интегральная кривая абсолютных значений интервальных объемов стока за длительный период не может расположиться на чертеже нормального размера по высоте без существенного уменьшения масштаба объемов. В результате она теряет наглядность и становится непригодной для проведения по ней расчетов регулирования стока. Поэтому в практике проектирования обычно используются разностные интегральные кривые. Сущность их видна на рис. 8.1 в, г, д. Разностная интегральная кривая аппроксимируется выражением

$$\Delta W = (Q_i - Q_0) \Delta t,$$

тогда

$$W = \Delta t \sum_0^t (Q_i - Q_0)$$

или

$$\Delta W = (Q_i - Q_{cp}) \Delta t, \quad W = \Delta t \sum_0^t (Q_i - Q_{cp}).$$

Здесь Q_0 — равномерный месячный расход воды, за который принимается ближайшее округленное значение по отношению к среднему расходу \bar{Q} . При машинных расчетах удобнее пользоваться \bar{Q} . Разностная интегральная кривая для приведенного на рис. 8.1 в гидрографа показана на рис. 8.1 г. На рис. 8.1 д нанесены интегральные кривые абсолютных значений стока (OA) и равномерного или среднего стока (OB). Ординаты разностной интегральной кривой в этом случае равны отрезкам между линиями OA и OB . Совместим линию OB с осью абсцисс, тогда прежняя ось абсцисс OC займет положение $O'C'$, т. е. развернется на угол α (рис. 8.1 е). Отсюда кривую $O'A'$, являющуюся по отношению осей $O'B'$ и $O'W'$ разностной интегральной кривой, по отношению осей $O'C'$ и $O'W'$ можно рассматривать как интегральную кривую в косоугольных координатах.

По сравнению с прямоугольными абсолютными интегральными кривыми разностные интегральные кривые в косоугольных координатах обладают рядом отличительных свойств, а именно: так как для отдельных периодов $Q_i < Q_0$ или $Q_i < \bar{Q}$, то кривая в эти периоды может опускаться; каждая ордината интегральной кривой представляет собой разность суммарных естественного стока

и равномерного (среднего) стока от начала построения до рассматриваемого момента времени, а разность ординат — $W_2 - W_1 = W_2 - W_1 - Q_0(t_2 - t_1)$ или $W_2 - W_1 - \bar{Q}(t_2 - t_1)$; тангенс угла наклона секущей или касательной выражает разность $(Q - Q_0)$ или $(Q - \bar{Q})$; при равенстве $Q_0 = \bar{Q}$ заключительная ордината W' приходит в точку O ; лучевой масштаб строится по аналогии с прямоугольной сеткой, но для того, чтобы от каждого расхода не отнимать Q_0 или \bar{Q} , его полюс приподнимается на Q_0 или \bar{Q} (рис. 8.1 ж).

При построении разностных интегральных кривых стока необходимо иметь в виду, что для них косоугольная сетка не обязательна, так как нарастание разностей стока во времени откладывается от прямой постоянного расхода (Q_0 или \bar{Q}), совпадающей с горизонтальной осью времени. Расходы, определяемые по интегральной кривой с помощью разработанного лучевого масштаба (рис. 8.1 ж), соответствуют абсолютным их значениям.

В практике проектирования используется разностная интегральная кривая, представляющая собой нарастание разностей между месячным стоком и равномерным (средним многолетним) месячным стоком.

В табл. 8.1 дан пример подсчета ординат разностной интегральной кривой стока, фрагмент которой показан на рис. 8.2.

Порядок заполнения граф таблицы следующий: по данным таблицы средних месячных расходов воды (подобной табл. 7.1) заполним графы 2 и 3. Вычисляем месячный сток ΔW как произведение среднего месячного расхода Q на среднее число секунд за месяц Δt ($\Delta t = 2,63 \cdot 10^6$ с), а затем суммарный объем стока на

Таблица 8.1

Подсчет ординат разностной интегральной кривой стока в створе р. Енисей — п. Базаиха

| № п/п | Интервал времени, Δt | Расход воды Q м ³ /с | Сток, км ³ | | | |
|-------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--|---|
| | | | месячный ΔW | суммарный (на конец Δt) W | суммарный равномерный (на конец Δt) W_0 | разность (на конец Δt) $W - W_0$ |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | 1906-07 | | | | | |
| 1 | IV | 2 890 | 7,60 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | V | 4 670 | 12,30 | 7,60 | 7,50 | 0,10 |
| 3 | VI | 11 500 | 30,30 | 19,90 | 15,00 | 4,90 |
| 4 | VII | 7 600 | 19,95 | 50,20 | 22,50 | 27,70 |
| 5 | VIII | 5 790 | 15,20 | 70,15 | 30,00 | 40,15 |
| | | | | 85,35 | 37,50 | 47,85 |
| 106 | I | 452 | 1,19 | 787,41 | 795,0 | -7,59 |
| 107 | II | 430 | 1,13 | 788,54 | 802,5 | -13,96 |
| 108 | III | 425 | 1,12 | 789,66 | 810,0 | -20,34 |

Проверка вычисления суммарного месячного объема стока: $W = \Sigma Q \cdot 2,63 \times 10^6 = 299646 \cdot 2,63 \cdot 10^6 = 788,1$ км³. Расхождение в объемах вполне допустимо.

конец Δt . Вычислив средний месячный сток по выражению $\Delta \bar{W} = W/n$, где W — суммарный сток за весь расчетный период, n — число интервалов (в нашем случае $\Delta \bar{W} = 789,66/108 = 7,31 \text{ км}^3$), выбираем равномерный месячный сток ΔW_0 принимая его равным ближайшему к $\Delta \bar{W}$ округленному значению. Одновременно с вы-

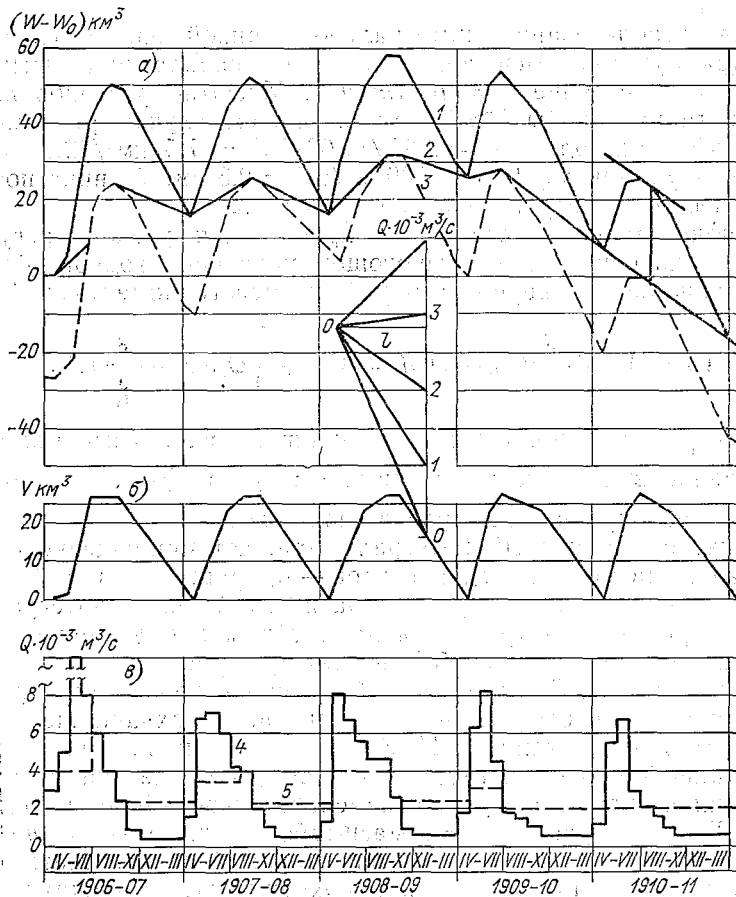


Рис. 8.2. Расчет сезонного регулирования стока.

а — интегральные кривые стока: естественного (1), зарегулированного (2) и контрольная (3); б — график наполнения и сработки водохранилища; в — графики расходов воды: естественных (4) и зарегулированных (5).

бором ΔW_0 назначаем масштабы для построения разностной интегральной кривой стока: горизонтальный (ось времени) в 3 мм — 1 месяц, а вертикальный (ось объемов) таким образом, чтобы котангенс угла поворота координат $\Delta t/\Delta W_0$ (при $\Delta W_0 = \Delta \bar{W}$) соответственно был близок к отношениям 1:1, 1:1,5; 1:2,0; 1:2,5; 1:3,0 или 3:5; 3:7; 3:8; 3:10. В приведенном здесь примере при масштабе времени m_t (3 мм — 1 месяц) и масштабе

объемов m_w (1 см — 10 км³) ΔW_0 принято равным 7,5 км³. Тогда $\Delta t/\Delta W_0 = 3$ мм; 7,5 мм = 1:2,5, что вполне допустимо.

Затем в графах 6 и 7 подсчитываем суммарный равномерный сток W_0 и разности $W - W_0$. По данным граф 2 и 7 табл. 8.1 строим интегральную кривую естественного стока (см. рис. 8.2, линия 1).

Для использования интегральной кривой рассчитывается и строится лучевой масштаб. Для этого сначала подсчитывается полюсное расстояние $l = m_w/(m_t m_Q)$. Масштаб расходов m_Q задается таким, чтобы $l \geq 1,5$ см. В нашем случае равномерный месячный расход $Q_0 = \Delta W_0/(2,63 \cdot 10^6) = 7,5 \text{ км}^3/(2,63 \cdot 10^6) = 2850 \text{ м}^3/\text{с}$, при m_Q 1 см — 500 м³/с $l = 2,3$ см. Техника построения лучевого масштаба показана на рис. 8.2.

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 расходуемой 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_w 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 регулирования стока, 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. 8.2), — исходной I , отвечающей сработанному полезному объему, и контрольной $З$, строящейся параллельно и ниже исходной на расстоянии (по вертикали), равном заданному полезному объему (в масштабе m_w), 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 расходам 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 $Q_b = 4000 \text{ м}^3/\text{с}$.

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 зарегулированных расходов, равных Q_b , к приточным окажется внутри месяцев, что следует иметь в виду при расчетах (см. рис. 4.1).

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.

8.2. Обобщенные методы расчета сезонного регулирования 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 при разных значениях постоянной в течение года водоотдачи α , выраженной в долях среднегодового расхода воды, определяют объем дефицита стока межени, или необходимый полезный объем регулирования стока. В дальнейшем его выражают в долях среднегодового объема стока $\beta_{\text{сез}}$. Полученные для каждого года значения относительного объема $\beta_{\text{сез}}$ ранжируют в возрастающем порядке, и производят подсчет их эмпирической обеспеченности $p = m/(n + 1)$. На основе полученных данных строят совмещенные кривые полезных объемов водохранилища в зависимости от обеспеченности водоотдачи $\beta_{\text{сез}} = f(p)$ при разных ее значениях. Для практического использования эти кривые зависимости перестраивают в график зависимости $\beta_{\text{сез}} = f(\alpha)$ для разных значений p . Для примера на рис. 8.3 приведены зависимости $\beta_{\text{сез}} = f(p)$ и $\beta_{\text{сез}} = f(\alpha)$ для обеспеченностей водоотдачи α 85 и 95 %. По зависимости $\beta_{\text{сез}} = f(\alpha)$ можно определять требуемый полезный объем водохранилища сезонного регулиро-

вания стока $\beta_{\text{сез}}$ для поддержания заданной водоотдачи α обеспеченностью p :

В случае неравномерной отдачи в течение года (на судоходных реках, где требуется обеспечить навигационные попуски) построить зависимость $\beta_{\text{сез}} = f(\alpha)$ можно только по дефицитам межени расчетной обеспеченности p . При этом определенные таким способом полезные объемы при заданных значениях водоотдачи (соответственно для летнего и зимнего периодов) следует относить к средней отдаче за год. При массовом проектировании водохранилищ этот метод является слишком громоздким, а в слу-

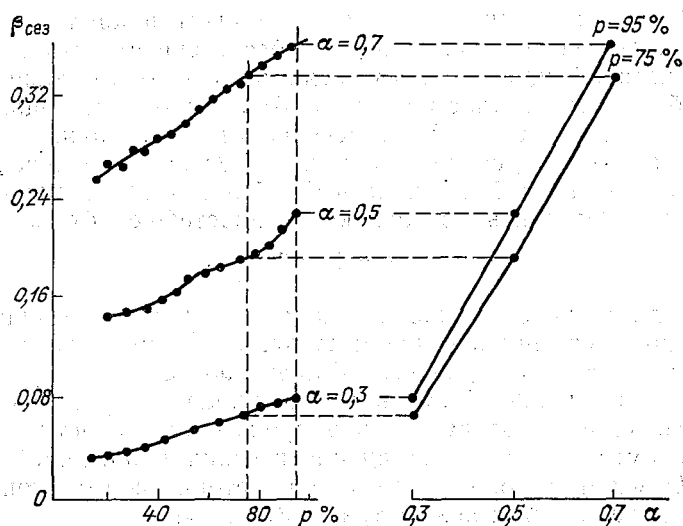


Рис. 8.3. Зависимости $\beta_{\text{сез}} = f(p)$ и $\beta_{\text{сез}} = f(\alpha)$.

чае отсутствия данных непосредственных наблюдений — неприемлемым.

В случае отсутствия данных непосредственных наблюдений расчеты полезного объема водохранилища сезонного регулирования стока ведут по приближенным обобщенным методам В. Г. Андреянова, С. Н. Крицкого — М. Ф. Менкеля, И. М. Панасенко, Ю. П. Бурнейкиса и др. Все они в различной модификации направлены на выбор модели маловодной межени расчетной обеспеченности p с неблагоприятным распределением стока, в которой возможен наибольший дефицит стока по отношению к заданной гарантированной водоотдаче, представляющей собой необходимый полезный объем водохранилища сезонного регулирования стока.

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

— годовой сток в виде модульного коэффициента годового стока расчетной обеспеченности $K_{\text{гр}}$;

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

— полезный объем водохранилища сезонного регулирования в виде коэффициента полезного объема $\beta_{сез} = V_{сез}/\bar{W}_r$, где $V_{сез}$ — полезный объем водохранилища сезонного регулирования, \bar{W}_r — средний многолетний объем годового стока ($\bar{W}_r = \bar{Q}_r \cdot 31,5 \cdot 10^6$, 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 α потребный полезный объем водохранилища рекомендуется определять по следующей простейшей формуле:

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

где t_m — длительность межени в долях года; \bar{m}_m — средняя многолетняя доля межени в годовом стоке; K_{mp} — 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_s).

Для расчета параметров меженного стока ($\bar{Q}_m, C_{vm}, C_{sm}$) сроки межени следует назначать жесткими (единицами 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 ($C_{vr} \approx C_{vm}$) может быть использована формула

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

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

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

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

В редких случаях при отсутствии длительного ряда наблюдений и неравномерности водоотдачи в течение года полезный объем рассчитывают по дефициту стока маловодного года, полученному методом компоновки (равнообеспеченного по маловодным периоду, сезону и году).

Абсолютные значения полезного объема водохранилища сезонного регулирования составят: $V_{\text{полезн}} = \beta_{\text{сез}} \bar{W}_r$, где \bar{W}_r — средний многолетний объем годового стока.

8.3. 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 Δt_i :

$$\begin{aligned} Q_{\text{акк}i} \Delta t_i &= \Delta V_{vi} = (Q_{\text{пр}i} - Q_{\text{зар}i}) \Delta t_i = \\ &= [Q_{\text{пр}i} - (Q_{\text{исп}} + Q_{\text{х. сбр}} + Q_{\text{п}})] \Delta t_i, \end{aligned} \quad (8.5)$$

где $Q_{\text{акк}i}$ — 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 Δt_i ; ΔV_{vi} — изменение объема водохранилища, характеризующее его сработку (минус) или наполнение (плюс); $Q_{\text{исп}}$, $Q_{\text{х. сбр}}$ — расходы соответственно полезно-используемый и сбросной; $Q_{\text{п}}$ — суммарный расход потерь воды из водохранилища на дополнительное испарение, фильтрацию и леодообразование и расход безвозвратного водопотребления; Δt_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. 8.2.

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 стокowym рядам задается однозначно для

Таблица 8.2

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

| Месяц и декада Δt | Естественный расход воды, m^3/c | | | | | Потери стока, m^3/c | | | | Расходы, средние за Δt , m^3/c | | Аккумуляция | | Наполнение водохранилища, km^3 | | Уровни водохранилища, м | |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------|-----------------|-------|-----------------------|-------------|--|--|--|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|-------------------------|--|
| | безвозвратное | дополнительное испарение | фильтрация | ледообразование | всего | приток нетто | запаривание | $Q_{акк} = Q_{пр} - Q_{зар}$, m^3/c | $\Delta V = Q_{акк} \Delta t$, km^3 | на конец Δt , V_k | на середину Δt , V_{cp} | на конец Δt , Z_k | на середину Δt , Z_{cp} | | | | |
| V 1 | 0 | -3 | 2 | -333 | -334 | 2579 | 1215 | 1364 | 1,05 | 20,58 | 516,4 | 514,7 | | | | | |
| 2 | 0 | -3 | 2 | 0 | -1 | 3102 | 1190 | 1912 | 1,65 | 22,23 | 521,5 | 519,0 | | | | | |
| 3 | 0 | -3 | 2 | 0 | -1 | 2993 | 1160 | 1833 | 1,74 | 23,97 | 526,0 | 523,8 | | | | | |
| VI 1 | 0 | -5 | 2 | 0 | -3 | 2275 | 1140 | 1135 | 0,98 | 24,95 | 528,2 | 527,1 | | | | | |
| 2 | 0 | -9 | 2 | 0 | -7 | 1996 | 1130 | 866 | 0,75 | 25,70 | 529,8 | 529,0 | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | | | | | |

каждого интервала. Суммарная отдача из водохранилища $Q_{\text{зар}}$ назначается в зависимости от начального уровня водохранилища в i -м интервале $\Delta t(Z_{iH})$ и корректируется в зависимости от значения конечного уровня водохранилища (Z_{iK}). Суммарные потери воды из водохранилища устанавливаются в зависимости от объема и режима водопотребления и уровней водохранилища в i -м интервале (Z_{iH} и Z_{iK}). 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 машинных расчетах, но смысл их сводится к отысканию такого значения Z_{iK} , которое приводило бы к выполнению равенства левой и правой частей уравнения.

Процесс регулирования упрощается при пользовании диспетчерским графиком управления работой водохранилища (см. п. 14.2). При ориентировании сработки водохранилища на дату самого позднего половодья оно не будет полностью срабатываться 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 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

ж 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. 8.4.

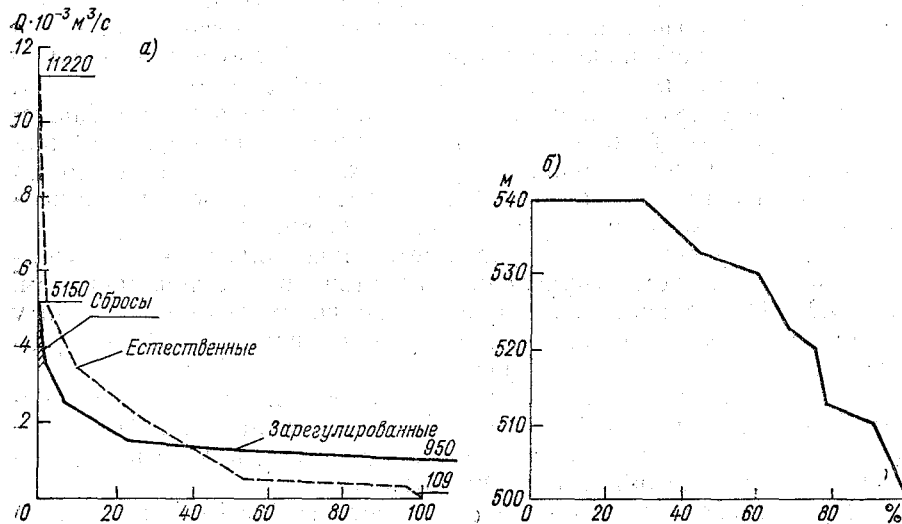


Рис. 8.4. Кривые продолжительности расходов воды (а) и уровней водохранилища (б).

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. На каком основании используются в расчетах регулирования стока интегральные кривые?
2. Какие Вы знаете обобщенные методы расчета сезонного регулирования стока?
3. 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. Сущность многолетнего регулирования подробно изложена в п. 4.2.

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 модификации). Второй подход основан на применении методов теории вероятностей и математической статистики, базирующихся на использовании обобщенных (вероятностных) стоковых характеристик, полученных по данным натуральных 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». Справедливость этих замечаний подтверждают и другие авторы. В частности, Н. А. Картвелишвили и А. Ф. Торонджадже отмечают, что эти приемы являются вариантом сугубо статистического метода Монте-Карло, причем очень несовершенным, так как гидрограф стока, полученный по данным наблюдений, необоснованно принимается за единственную реализацию случайного процесса.

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 $V_{\text{мн}}$, ее относительное значение обозначается $\beta_{\text{мн}}$ ($\beta_{\text{мн}} = V_{\text{мн}}/\bar{W}_g$, где \bar{W}_g — 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 $\beta_{\text{с.с}} = V_{\text{с.с}}/\bar{W}_g$, где $V_{\text{с.с}}$ — сезонная состав-

ляющая полезного объема водохранилища. Сезонная составляющая полезного объема водохранилища определяется независимо от многолетней при помощи специальных методов.

Таким образом, полезный объем водохранилища многолетнего регулирования

$$V_{\text{полезн}} = V_{\text{мн}} + V_{\text{с.с}}$$

или в относительных единицах

$$\beta_{\text{полезн}} = \beta_{\text{мн}} + \beta_{\text{с.с}}$$

В настоящее время имеются приемы расчета всего полезного объема без разделения его на составляющие части (Ш. Ч. Чокин, В. Д. Киктенко, Б. Б. Байшев и др.). В проектной практике значительно больше распространены методы отдельного определения многолетней и сезонной составляющих полезного объема водохранилища.

9.2. Расчеты регулирования методами теории вероятностей и математической статистики

Композиционный графический метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля. Номограммы Я. Ф. Плещкова. | Практически в основе любого существующего обобщенного метода лежит второй метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля или так называемый композиционный графический метод. Композиция заключается в нахождении закона распределения суммы по заданным распределениям слагаемых |

Расчеты вероятностными методами обычно ведутся в относительных величинах: годовой сток любого числа ряда Q_i выражается модульным коэффициентом $K_i = Q_i / \bar{Q}_r$, где \bar{Q}_r — средний многолетний расход воды, м³/с; гарантированная водоотдача из водохранилища $Q_{\text{гар}}$ — в виде коэффициента регулирования α ; многолетний объем водохранилища $V_{\text{мн}}$ — в виде коэффициента многолетнего объема $\beta_{\text{мн}}$ (в дальнейшем β); обеспеченность гарантированной водоотдачи p , т. е. число лет, в которых водоотдача будет не ниже $Q_{\text{гар}}$ по отношению к общему числу лет ряда, в процентах или долях единицы.

Идея метода состоит в последовательном анализе всевозможного сочетания годов по степени их водности. Исходными при этом являются: кривая обеспеченности (вероятности превышений) годового стока, характеризуемая величинами $C_{\text{ог}}$ и $C_{\text{ог}} = 2C_{\text{ог}}$; заданные β и α .

Смысл такого анализа заключается в следующем (рис. 9.1).

Соответствующими заданными модульными коэффициентами $K = \alpha$ и $K = \alpha - \beta$ все годы N , изменчивость которых описывается кривой распределения вероятностей, разбиваются на две основные группы:

1) безусловно перебойные числом $S_1 = 1 - p_{\alpha-\beta}$, которые не дают гарантии в обеспечении плановой отдачи α даже при заполненном к началу года объеме водохранилища β (дефицит стока в эти годы $\alpha - K > \beta$);

2) безусловно неперебойные числом $A_1 = p_\alpha$. Отдача α в такие годы, у которых $K > \alpha$, полностью удовлетворяется стоком K , т. е. даже если водохранилище в начале года было опорожненным. Все оставшиеся годы числом $N_1 = p_{\alpha-\beta} - p_\alpha$ образуют так называемую сомнительную группу. Каждый из них, хотя сам по себе и является обеспеченным, в сочетании с предшествующими ему годами может оказаться перебойным. Чтобы определить, какое число лет этой группы даст перебой совместно с одним предшествующим годом, необходимо построить кривую обеспеченности суммарного стока за двухлетие $(K_1 + K_2)$, из которых один (K_1) является любым годом из группы N_1 и второй (K_2) — любым годом основного ряда. Техника расчета при этом заключается в композиции сомнительного участка кривой обеспеченно-

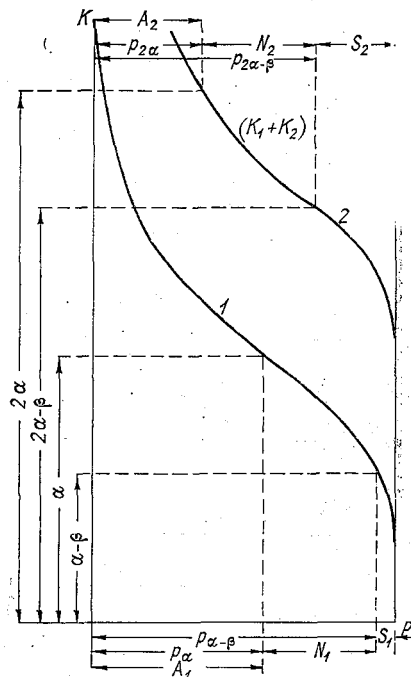
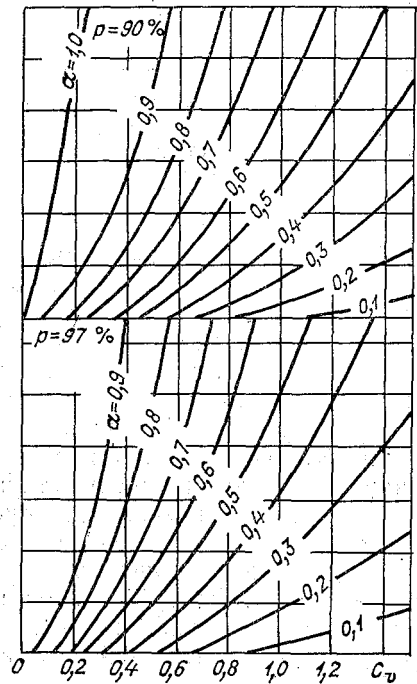
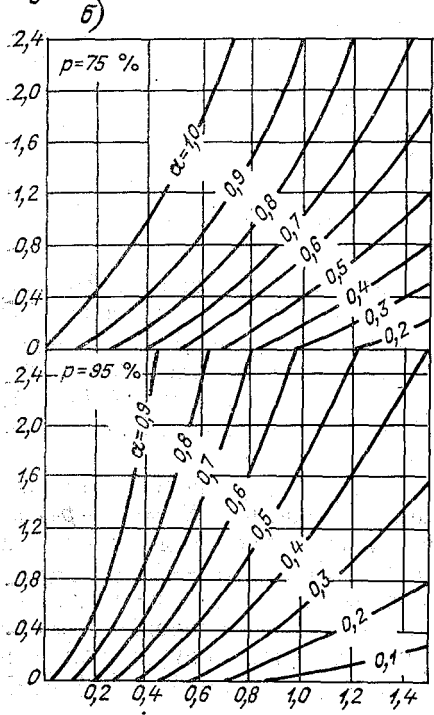
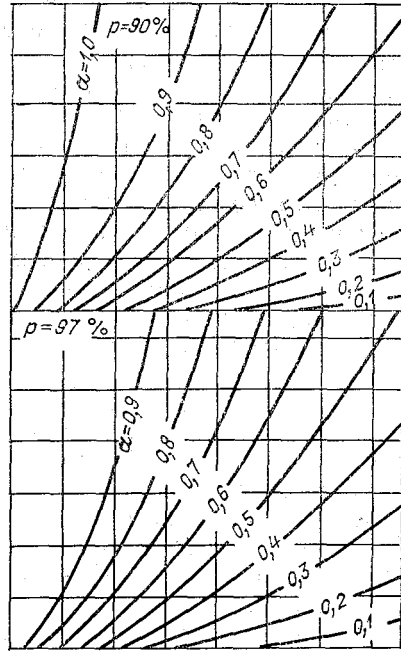
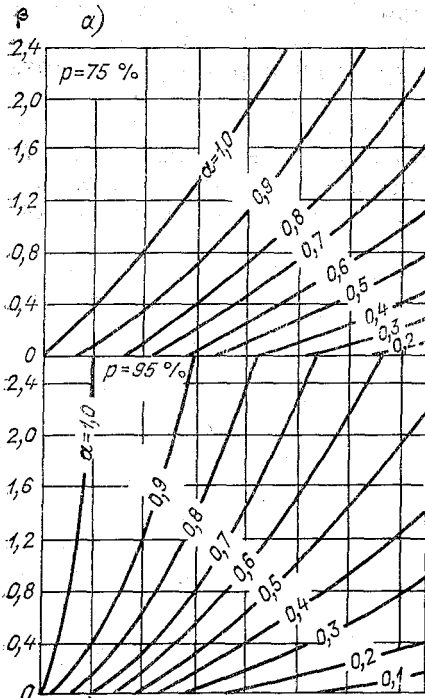


Рис. 9.1. Схема расчета многолетнего регулирования стока по композиционному графическому методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

сти N_1 с исходной кривой обеспеченности годовых значений стока (линия 2 на рис. 9.1). Условием перебойности для парных комбинаций из смежных лет этой группы служит неравенство $K_1 + K_2 < 2\alpha - \beta$. Если выполняется указанное условие, то данный год следует отнести к первой группе (безусловно перебойным). Число лет, дающих перебой в комбинации с предшествующим годом, составит $S_2 = 1 - p_{2\alpha-\beta}$.

Аналогично выясняется сколько лет S_3 дадут перебой в комбинации с двумя предшествующими годами ($S_3 = 1 - p_{3\alpha-\beta}$) и т. д. Следовательно, вся группа N сортируется до конца на обеспеченные и необеспеченные годы. Сумма $S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n = S$ дает общее число перебойных лет за исследуемый стокный ряд. Число перебойных лет S_n с увеличением числа лет n быстро убывает, поэтому полная стабилизация кривой распределения вероятностей суммарного стока n -летий $(K_1 + K_2 +$



$+ K_3 + \dots + K_n$) наступает при ограниченном (небольшом) числе слагаемых.

Так как при построении кривых обеспеченности стока двухлетних, трехлетних и т. д. только одна слагаемая (кривая обеспеченности однолетних значений стока) входит с весом (по основанию), равным единице, а остальные слагаемые — с весом меньше единицы — N_1, N_2, \dots , то взятые с чертежа величины S_2, S_3, \dots являются относительными числами перебойных лет. Чтобы получить абсолютные их значения, необходимо учесть вес входящих слагаемых. Исходя из этого безусловная вероятность (относительное число) перебойных лет составит: $S = S_1 + S_2 N_1 + S_3 N_1 N_2 + \dots$.

Искомая обеспеченность p отдачи α , равная количеству безусловно обеспеченных лет, определяется как $p = 100(1 - S)$.

Для установления же нормируемой обеспеченности водоотдачи и соответствующего многолетнего объема водохранилища необходимо выполнить не менее трех-четырёх указанных расчетов. Отсюда видно, что изложенный метод сводится к довольно громоздкой и в то же время трудоемкой итерационной схеме расчета.

Широкому распространению в практике водохозяйственного проектирования этого метода способствовали номограммы Я. Ф. Плешкова. Они позволили заменить указанную громоздкую работу простейшими графическими операциями по снятию с них искомых параметров (α, β и p_α).

Номограммы Плешкова, приведенные на рис. 9.2 а, были построены в предположении, что коррелятивная связь между стоком в смежные годы отсутствует, т. е. $r_1 = 0$. Однако такое допущение в большинстве случаев не подтверждается. При построении номограмм в качестве функции распределения стока принята кривая Пирсона III типа ($C_s = 2C_0$), что также является определенным допущением. Границы изменения искомых параметров на номограммах Плешкова следующие: коэффициента регулирования стока α до 0,90; $C_{от}$ до 1,20; β 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. 7.6 и не представляет трудности.

Композиционный аналитический метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля. Номограммы И. В. Гуглия. В многолетнем разрезе изменений стока прослеживается некоторая цикличность

Рис. 9.2. Номограммы для определения многолетней составляющей полезного объема водохранилища.

а — Я. Ф. Плешкова ($C_s = 2C_0, r_1 = 0$); б — И. В. Гуглия ($C_s = 2C_0, r_1 = 0,3$).

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 следует определять по известной зависимости:

$$C_v(n) = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} r_1(n-1)}, \quad (9.1)$$

где r_1 — коэффициент корреляции объемов стока смежных лет.

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

В связи с этим в 50-е годы С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель усовершенствовали свой графический метод в направлении учета цепных (коррелятивных) связей между годовыми объемами стока в смежные периоды времени.

В основе модернизированного метода лежит композиционный графический метод тех же авторов, однако в данном случае композиция кривых обеспеченности выполняется аналитически.

Аналитическая композиция сомнительной группы (сомнительного участка кривой обеспеченности) n -летий в интервале отдачи, например для первого расчета — $n\alpha$ и $n\alpha - \beta$ с предшествующим годом (исходной кривой обеспеченности стока), осуществляется посредством параметров распределения стока $(n+1)$ -летий, устанавливаемых по следующим зависимостям:

а) среднее распределение

$$\bar{\Gamma}_{(n+1)(n)} = \bar{\Gamma}_1(n+1) + \Phi_1(\bar{\Gamma}_{(n)} - \bar{\Gamma}_1 n), \quad (9.2)$$

где $\bar{\Gamma}_{(n+1)(n)}$ — условное среднее значение стока $(n+1)$ -летий при стоке завершающего сомнительного n -летия, равно $\bar{\Gamma}_{(n)}$; $\bar{\Gamma}_1$ — безусловное среднее значение годового стока; $\bar{\Gamma}_1(n+1)$ — безусловное среднее значение стока $(n+1)$ -летий; Φ_1 — коэффициент, учитывающий коррелятивную связь стока смежных лет;

б) расчетное значение коэффициента изменчивости стока $(n+1)$ -летий

$$C_v(n+1)(n) = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 \Phi_2 + \mu_2(n)}{\bar{\Gamma}_{(n+1)(n)}}}, \quad (9.3)$$

где σ_1 — среднее квадратическое отклонение годовых значений

стока; $\mu_{2(n)}$ — дисперсия колебаний стока сомнительных n -летий; Φ_2 — коэффициент, учитывающий коррелятивную связь стока смежных лет;
 в) расчетное значение коэффициента асимметрии стока $(n+1)$ -летий

$$C_{s(n+1)(n)} = 2C_{\sigma(n+1)(n)} / (1 - x_n), \quad (9.4)$$

где x_n — нижний предел колебания стока сомнительных n -летий.

Параметры сомнительных n -летий $\bar{\Gamma}_{(n)}$ и $\mu_{2(n)}$ могут быть определены непосредственно по точкам сомнительного участка кривой обеспеченности. Используемые для этой цели расчетные зависимости имеют вид:

$$\bar{\Gamma}_{(n)} = \frac{1}{S} \left(\frac{y_B}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{s-1} \right) + (n\alpha - \beta), \quad (9.5)$$

$$\mu_{2(n)} = \frac{1}{S} \left(\frac{y_B^2}{2} + y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_{s-1}^2 \right) - \left[\frac{1}{S} \left(\frac{y_B}{2} + y_1 + y_2 + \dots + y_{s-1} \right) \right]^2, \quad (9.6)$$

где y_B — амплитуда колебаний стока сомнительных n -летий; y_1, y_2, \dots, y_{s-1} — ординаты сомнительного участка кривой обеспеченности над величиной $(n\alpha - \beta)$; $(n\alpha - \beta)$ — нижний предел колебания стока сомнительных n -летий (при $n\alpha < \beta$ он равен нулю).

Расчетная схема для определения параметров сомнительных n -летий показана на рис. 9.3.

Коэффициенты Φ_1 и Φ_2 представляют собой функцию числа лет n и коэффициента корреляции r_1 между стоком смежных лет. После преобразований эти функции приведены к следующему виду:

$$\Phi_1(n, r_1) = 1 + \frac{r_1(1 - r_1^n)}{n(1 - r_1) \left[1 + \frac{2}{n} \frac{r_1}{1 - r_1} \left(n - \frac{1 - r_1^n}{1 - r_1} \right) \right]}, \quad (9.7)$$

$$\Phi_2(n, r_1) = 1 - \frac{r_1^2(1 - r_1^n)^2}{n(1 - r_1^2) \left[1 + \frac{2}{n} \frac{r_1}{1 - r_1} \left(n - \frac{1 - r_1^n}{1 - r_1} \right) \right]}. \quad (9.8)$$

Значения этих функций при $r_1 = 0,3$ и различных n вычислены И. В. Гуглием и приведены в его работе.

Как видно из изложенного, параметры сомнительных n -летий определяются по довольно сложным зависимостям. Однако при разработке техники практических расчетов выявлена допустимость применения упрощенных приемов их вычисления. Например, в обычных условиях, когда многолетний объем водохранилища не превышает $(2-3)\sigma$ годовых объемов стока, и при отно-

сительной небольшой изменчивости стока ($C_v < 0,8$), сток $\Gamma_{(n)}$, влияющий на условное среднее $\bar{\Gamma}_{(n+1)(n)}$, может быть принят равным медиане сомнительного интервала y_m (см. рис. 9.3), так как в этом случае $(n\alpha - \beta)$ будет равно нулю, а дисперсия по выражению

$$\mu_{2(n)} = y_m^2 \eta, \quad (9.9)$$

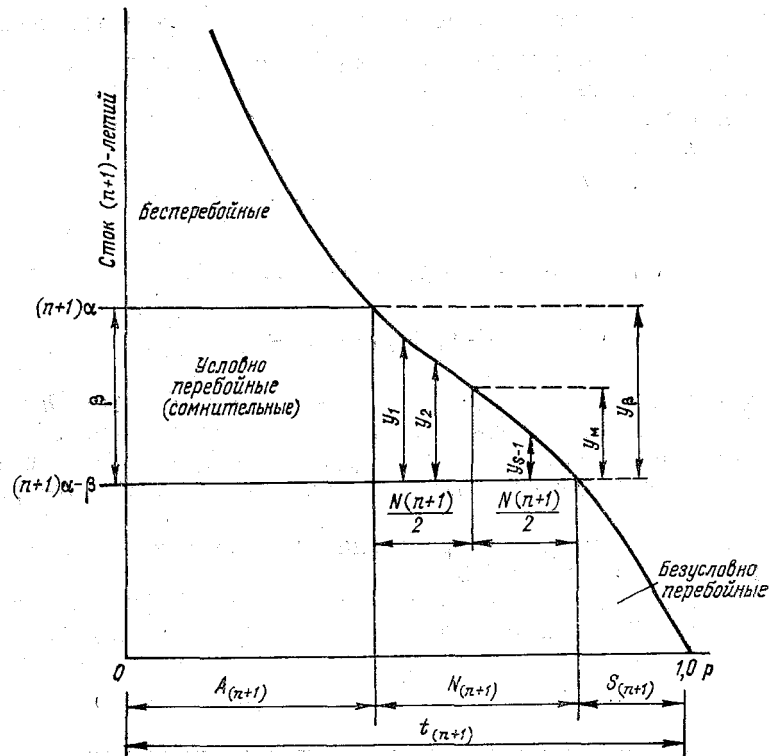


Рис. 9.3. Схема расчета многолетнего регулирования стока по композиционному аналитическому методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

где η — вспомогательный коэффициент, оценивающий характер распределения стока в пределах сомнительного участка кривой обеспеченности. Он устанавливается в зависимости от отношения y_m/y_b (по рис. 9.3).

По кривым обеспеченности (см. рис. 9.3) вычисляются условные вероятности $S_{(n+1)}$, $A_{(n+1)}$, $N_{(n+1)}$, $t_{(n+1)}$. Путем умножения условных вероятностей $S_{(n+1)}$ перебойных лет и $A_{(n+1)}$ бесперебойных лет на произведения $N_{(n)} = N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_n$ подсчитываются безусловные вероятности перебойных и бесперебойных лет.

В связи с высокой трудоемкостью аналитического композиционного метода возникла необходимость в построении специаль-

ных номограмм
зываются
том и
обеспечивают
ного
нем за
ковых
1,20; β
для при
Значения
грамм
брутто,
(используемых
в основном)
Для
($0 < r_1 < 0,3$)
(или иной)
между номограммами
При построении
Я. Ф. Плешкова
мал кривую
метрии S_s
Сопоставление
Я. Ф. Плешкова
учете автокорреляции
дачи. Расхождение
ности стока
относительно
В табл. 9.
номограмм
мать многолетние
нища.
Метод статистического
Энергосетей
дом. Методом Монте-Карло
никовского
ность при
задач на основе
тельно к гидрологическим
тогда состоит
соответствующим
речного стока
рядов (наблюдениям)
не только значениям
циентов вариации
ляции r_1),
стока. В этом
искусственно
пимально

10

чных номограмм Я. Ф. Плешкова, связанный с объемом водохранилища β с коэффициентом стока и коэффициентом водоотдачи α на основе номограммы на основе модернизированной работы И. В. Гуглием при $r_1 = 0,3$ (среднего СССР) в широком диапазоне стоковых характеристик: α до 0,95; $C_{\text{вт}}$ до 90, 95, 97 и 99 %. Номограммы И. В. Гуглиевы (рис. 9.2 б).
 αW_r , входящие в изображение на номограмме зависимости, также характеризуют отдачу объема воды, изымаемой из водохранилища (с учетом потерями объема воды плюс потери воды в основном).
Для значений коэффициента корреляции r_1 (0,3) многолетний объем водохранилища β (параметр) находится путем интерполяции между номограммами Я. Ф. Плешкова и И. В. Гуглиевыми.
При построении номограмм И. В. Гуглиевых, так же как и в работе функции распределения стока приняты I типа. В этом случае коэффициент асимметрии S_s является определенным допущением.
Сопоставление номограмм И. В. Гуглиевых с номограммами Я. Ф. Плешкова свидетельствует о том, что во всех случаях при $r_1 > 0,3$ отмечается уменьшение расчетной водоотдачи, чем больше коэффициент изменчивости стока, тем больше водоотдача, что полностью следует из принципа учета связности годового стока. В табл. 9.1 и на рис. 9.2, за β следует принимать значения, представляющие полезный объем водохранилища.
Метод испытаний (Монте-Карло). Номограммы для моделирования гидрологических рядов методом Монте-Карло разработаны Г. Г. Сванидзе, А. Ш. Резером. Методом Монте-Карло понимается совокупность методов, с помощью которых можно получить решение задачи на основе случайных испытаний. Применительно к регулированию стока основная идея метода состоит в том, что для искусственного гидрологического ряда, по мере соответствия исходного натурального процесса (критерия соответствия указанных двух рядов) обычно принимается постоянство значений параметров стока (нормы \bar{Q}_r , коэффициент асимметрии S_s , коэффициент автокорреляции r_1), функции распределения годовых значений стока. В этом случае искусственно созданный ряд не увеличивает и принципиально не уменьшает репрезентативность исходного гидрологического ряда.

Таблица 9.1

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

| Параметр регулирования | | | Расчетная водоотдача | | Среднее уменьшение водоотдачи, % |
|------------------------|--------------|---------|--------------------------|------------------------|----------------------------------|
| p % | C_{σ} | β | по Плешкову $r_1=0,0$ | по Гуглию $r_1=0,3$ | |
| 90 | 0,60 | 1,20 | 0,85 | 0,75 | 10 |
| | | 0,80 | 0,77 | 0,69 | |
| | | 0,40 | 0,64 | 0,57 | |
| | 0,80 | 1,20 | 0,75 | 0,62 | 15 |
| | | 0,80 | 0,65 | 0,55 | |
| | | 0,40 | 0,50 | 0,43 | |
| 97 | 0,60 | 1,20 | 0,73 | 0,63 | 15 |
| | | 0,80 | 0,65 | 0,56 | |
| | | 0,40 | 0,52 | 0,43 | |
| | 0,80 | 1,20 | 0,62 | 0,48 | 25 |
| | | 0,80 | 0,53 | 0,41 | |
| | | 0,40 | 0,39 | 0,29 | |

рологического 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.

Метод статистических испытаний позволяет моделировать гидрологические ряды как без учета внутригодовых колебаний стока (в отношении только годового стока), так и с учетом последних.

В первом случае расчеты регулирования должны вестись только в отношении многолетней составляющей полезного объема водохранилища. Сезонная составляющая полезного объема определяется дополнительным расчетом.

Задача регулирования по смоделированным гидрологическим рядам с учетом внутригодовых колебаний стока должна решаться по полному полезному объему, без условного деления его на составляющие части — многолетнюю и сезонную.

Результаты расчетов (гарантированного, обеспеченного, расхода, мощности, выработки электроэнергии, напора и т. д.) рассматриваются как реализация годовых случайных характеристик регулирования, по которым рассчитываются и строятся распределения вероятностей той или иной характеристики.)

Так, например, 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 с помощью ЭЦВМ 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 измерения коэффициента вариации от 0,2 до 1,5 с интервалом 0,1. По каждому ряду проводились расчеты регулирования стока для значений отдачи α от 0,1 до 1,0 с интервалом 0,1. Нижняя граница измерения многолетнего объема водохранилища β 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 $F(C_v, r_1, \alpha, \beta, p) = 0$, 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 И. В. Гуглия или Энергосетьпроекта позволяют определять многолетнюю составляющую полезного объема водохранилища для заданных параметров годового стока ($C_{гг}$, C_s/C_v , r_1), гарантированной водоотдачи α 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

Рис. 6.3. Формулы для определения (см. п. 6.3). Например, если требуется гарантировать водопользователю обеспеченностью p_1 , а отдачу α_2 с обеспеченностью p_2 и т. д., а $p_1 < p_2$, то

$$\alpha = \frac{p_1 - p_2}{p_1} \alpha_1 + (p_2 - p_1) \alpha_2 / \alpha_1.$$

Величины α и β номограмм при известных $C_{ог}$, C_s/C_v и т. д. можно определить по многолетней составляющей полезного объема воды, необходимого для регулирования стока на две обеспеченности. Вероятно, не стоит упускать методы и методы математического моделирования. Методы, разработанные применительно к параметрам годового стока (например, для определения, что коэффициенты корреляции объема годового стока через один, два и т. д. лет (r_2 , r_3 и т. д.) практически незначительны). Однако в ряде случаев данные коэффициенты достаточно информативны и, как показали исследования В. А. Шенюк, могут привести к увеличению многолетнего объема воды в бассейнах с большими $C_{ог}$ и α до 10—15%. Отсутствие же длительных рядов наблюдений за стоком не позволяет сделать практические выводы о наличии сверхдальних связей между значениями стока. Кроме того, отсутствуют и номограммы, позволяющие выразить зависимость при разных значениях коэффициентов корреляции (r_2 , r_3 и т. д.). Все это не позволяет в настоящее время практически использовать результаты исследований В. А. Шенюк. Асимметричность годового стока некоторых рек Сибири и Дальнего Востока, на которых в настоящее время проектируется водохранилища, значительно отличается от отношения $C_{ог}/C_v$ для некоторых из них разработаны вышеприведенные номограммы. Поэтому не следует пренебрегать и номограммами В. П. Иванова. В этом отношении получены не композиционными методами, а путем обобщения результатов многолетнего регулирования по конкретным гидрологическим рядам 18 рек. При расчете номограмм Г. П. Иванов принимал водоотдачу α и многолетний расход воды β в виде следующих функций от $C_{ог}$ и C_v :

$$\alpha = 0,4 + 0,6 \frac{C_{ог}}{C_v} \quad \beta = 0,1 + 0,9 \frac{C_{ог}}{C_v}.$$

Номограммы вида $\xi = \varphi(\Phi, C_s, T)$ разработаны для p , равной 80, 85, 90, 95, 97, 99 и 100%. Для примера даны номограммы для φ , равной 90 и 95%. Эти номограммы обладают существенными преимуществами перед вышеприведенными номограммами, а именно: даны для решения задачи в зависимости от C_s , т. е. не связывая вопрос о состоянии реки с C_v или $C_{ог}/C_v = 1,5$ и 4,0; α рассчитано для $C_{ог} = 1$ и $C_v = 1,5$ и 4,0; β рассчитано для $C_{ог} = 1$ и $C_v = 1,5$ и 4,0; β равен 0,19.

Водоотдача α по номограммам Г. П. Иванова, как и по другим номограммам, характеризуется отдачей в грунте, т. е. полезной площадью α и β и т. д. и потерей воды на испарение.

Методы определения сезонной составляющей полезного объема водохранилища многолетнего регулирования стока. В случае мно-

голетнего регулирования стока ($K_{гр} < \alpha \leq 1,0$) сезонная составляющая полезного объема лишь условно отделяется от многолетней и определяется во взаимосвязи со всеми параметрами водохранилища. При этом сохранение той же маловодности расчетной межени, как и в случае годового регулирования, привело бы к преувеличению 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 α . 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 α). 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:

$$\beta_{с.с} = \alpha t_m - \bar{m}_m + \bar{m}_m \frac{1 - K_{мп}}{1 - K_{гр}} (1 - \alpha). \quad (9.10)$$

Здесь обозначения те же, что и в формулах (8.3) и (8.4). По мере приближения к $\alpha = 1,0$ сток расчетной межени стремится к \bar{m}_m и в пределе сезонная составляющая определяется в расчете на среднюю по водности межень.

Для $\alpha = 1,0$ формула (9.10) принимает вид

$$\beta_{с.с} = t_m - \bar{m}_m. \quad (9.11)$$

Если коэффициенты изменчивости годового $C_{вг}$ и меженного $C_{вм}$ стоков характеризуются близкими значениями, то $K_{мп}$ может считаться равным $K_{гр}$. Тогда формула (9.10) упрощается и приобретает вид

$$\beta_{с.с} = \alpha (t_m - \bar{m}_m). \quad (9.12)$$

Абсолютные значения сезонной составляющей полезного объема водохранилища при многолетнем регулировании

$$V_{с.с} = \beta_{с.с} \bar{W}_r.$$

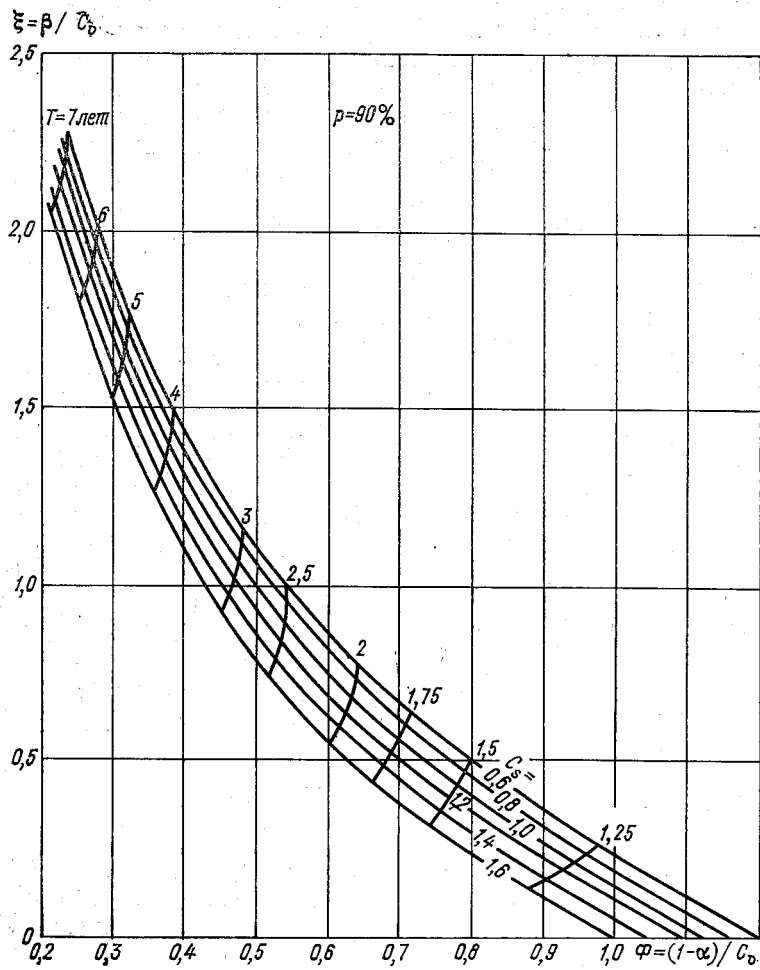
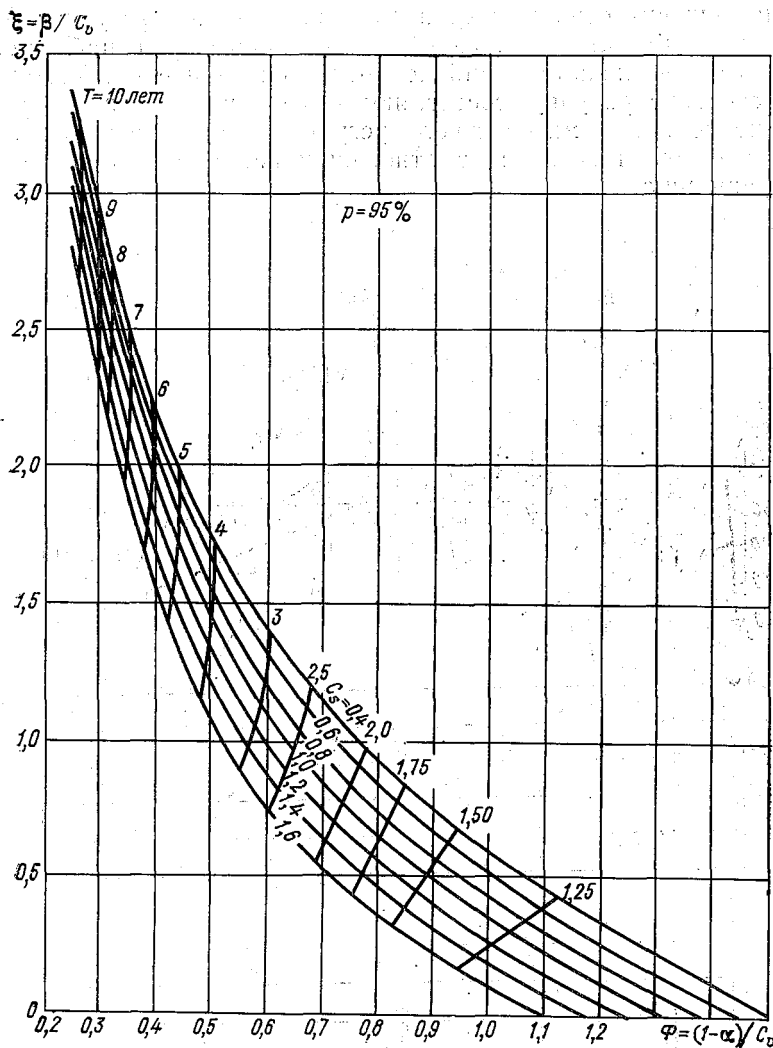


Рис. 9.4. Номограммы Г. П. Иванова для определения многолетней

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 $Q_{зар} = \alpha Q_{г.}$) года со стоком, равным водоотдаче α . Во избежание преуменьшения сезонной составляющей ее следует рассчитывать применительно к нескольким моделям помесичного распределения стока с последующей приводкой их к годовой водоотдаче, умножая среднемесячные расходы моделей на коэффициенты приводки K' . При этом $K' = Q_{зар} / Q_{г.}$. Здесь $Q_{г.}$ — среднегодовой расход модели. За расчетное значение сезонной составляющей объема



составляющей полезного объема водохранилища.

принимается наибольший дефицит стока в рассмотренных пяти — семи моделях распределения стока.

9.3. Расчеты многолетнего регулирования графическим способом по интегральной кривой стока

Сущность интегральной кривой стока и основные принципы ее использования для решения задач регулирования стока изложены в п. 8.1.

Для решения основных задач при многолетнем регулировании стока на интегральной кривой за длительный ряд наблюдений (рис. 9.5) отыскивается наиболее маловодный период. Такой период, согласно рисунку, составляют годы с шестого по девятый. Решение задач многолетнего регулирования графоаналитическим способом проводится в отношении всего полезного объема водохранилища.

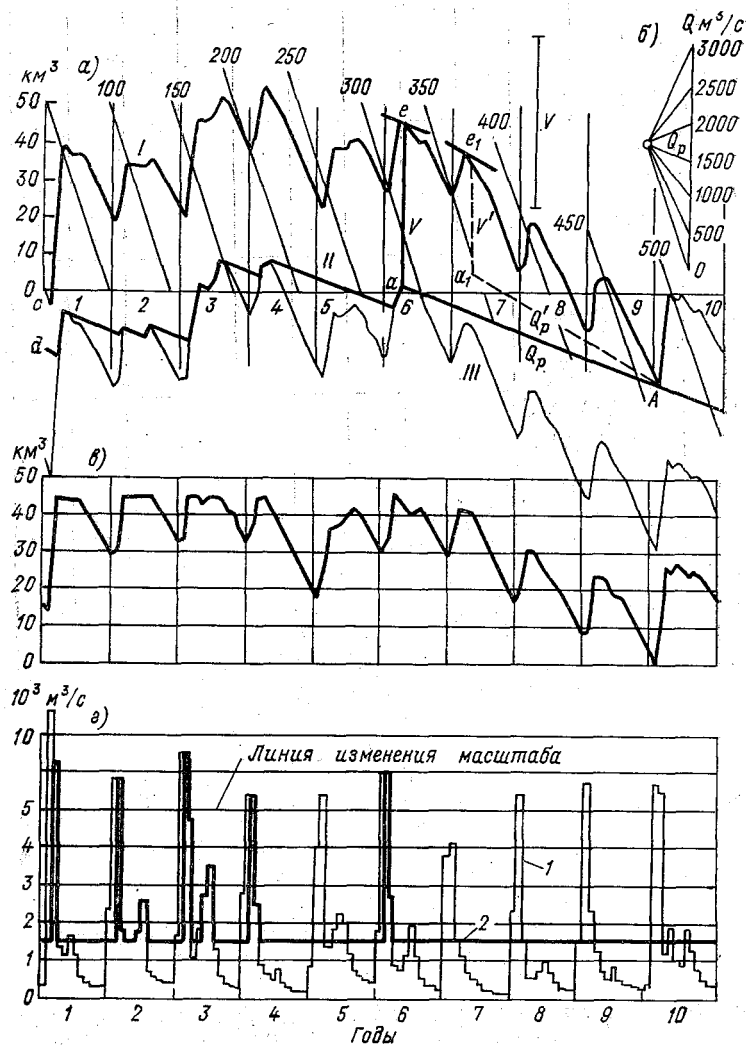


Рис. 9.5. Расчеты многолетнего регулирования по интегральной кривой стока.

a — интегральные кривые: естественного стока (*I*), зарегулированного стока (*II*) и контрольная (*III*); *b* — лучевой масштаб; *в* — график наполнения водохранилища; *г* — графики естественных (*1*) и зарегулированных (*2*) расходов воды.

Первая задача (по заданному расходу определить полезный объем водохранилища) решается проведением касательной Aa к интегральной кривой в конце маловодья «ходом назад» с наклоном заданного расхода Q_p . Наибольшее расстояние ae между проведенной касательной и интегральной кривой в пределах маловодья и определит необходимый для осуществления многолетнего регулирования полезный объем водохранилища V по заданному расходу Q_p . В случае задания меньшего расхода Q'_p полезный объем водохранилища составит V' . При расходе Q_p в сработку включены годы только с седьмого по девятый.

Определив таким образом V , проводят расчеты регулирования по остальным годам имеющегося ряда, для чего строят контрольную интегральную кривую (см. рис. 9.5), соответствующую наполненному водохранилищу. Интегральная кривая естественного стока соответствует пустому водохранилищу. Расчеты с расходом Q_p , 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 a , в которой определен 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 aA , которая является касательной к основной кривой в точке A (конца маловодья) и к контрольной в точке a (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. 9.5 б, в. На графиках видно, что в течение 5 лет сбросов не было и сохранялись постоянные зарегулированные расходы. В остальные 5 лет водохранилище заполнялось до НПУ и работало со сбросами.

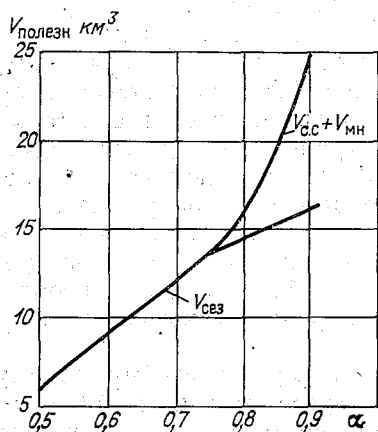
Расчетами по интегральной кривой за длительный гидрологический ряд можно построить зависимость зарегулированного расхода $Q_{зар} = f(V_{полезн})$ или $\alpha = f(V_{полезн})$.

Зависимость рассчитывается путем определения необходимых $V_{полезн}$ для нескольких значений $Q_{зар}$ ($Q_{мин} < Q_{зар} \leq Q_{г}$). Такая зависимость, асимптотически приближающаяся к норме годового стока $Q_{г}$, приведена на рис. 9.6. Анализ кривой показывает, что в зоне многолетнего регулирования значительные приращения полезного объема водохранилища слабо влияют на зарегулированный расход. Это объясняется тем, что с ростом полезного объема

увеличивается период его сработки T . Поскольку приращение зарегулированного расхода $\Delta Q_{\text{зар}}$ обратно пропорционально величине T , то относительный эффект от приращения полезного объема понижается и в пределе (при $Q_{\text{зар}} \approx \bar{Q}_r$) стремится к нулю, когда T стремится к бесконечности:

$$\Delta Q_{\text{зар}} = \Delta V/T = 0.$$

Однако это не означает, что высокая степень регулирования менее выгодна, чем низкая. Экономические показатели зависят



от стоимости повышения подпора, которая изменяется в зависимости от топографии и геологии чаши водохранилища и других местных условий. Найденный таким способом расход Q обеспечивается в течение всего периода эксплуатации, т. е. гарантированная водоотдача из водохранилища обеспечивается на 100%. При наперед заданной обеспеченности водоотдачи в со-

Рис. 9.6. Зависимость коэффициента регулирования стока α от полезного объема водохранилища.

ставе наблюдаемого гидрологического ряда выделяется определенное число перебойных лет (со сниженной водоотдачей по сравнению с гарантированной). За счет более низкой водоотдачи в перебойные годы несколько повышается гарантированная водоотдача по сравнению с расходом Q , определенным по наиболее неблагоприятному маловодному периоду. Если, например, снижение водоотдачи по сравнению с расходом Q принимается равным 30%, то гарантированный расход составит

$$Q_{\text{гар}} = (QT - 0,7Qt)/(T - t), \quad (9.13)$$

где T — длительность маловодного периода, определившего Q , в месяцах; t — длительность периода со сниженной водоотдачей ($0,7Q$) в месяцах.

Выше рассмотрены случаи регулирования стока на постоянный расход. Расчеты регулирования по интегральным кривым на жестко заданный ступенчатый график расходов ведутся в той же последовательности, как и для случаев регулирования на постоянный расход. В этом случае линия зарегулированных расходов будет ломаной. Точки перелома соответствуют началу — концу времени изменения расходов. Ведется эта линия, как и прежде, «ходом назад».

Недостатками графической формы расчета является невысокая точность и определенная трудоемкость. Однако при рассмотрении в проекте ряда вариантов параметров водохранилищ эта форма расчетов удобна и вполне применима.

9.4. Расчеты многолетнего регулирования стока балансовым табличным способом по календарным гидрологическим рядам

Расчеты многолетнего регулирования стока балансовым табличным способом проводятся в форме табл. 8.2, реализующей уравнение водного баланса (8.5). Такие расчеты проводятся по длительному гидрологическому ряду или его расчетному периоду на заключительных стадиях проектирования в целях уточнения параметров водохранилища, установленных предварительно обобщенными или графоаналитическими способами. В целях упрощения трудоемких табличных расчетов они, как правило, проводятся с использованием диспетчерского графика управления режимом работы водохранилища (см. гл. 14).

Порядок заполнения граф таблицы остается тем 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 длительности 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. 9.5). Для количественной оценки изменения характеристик зарегулированного режима рассчитываются и строятся кривые продолжительности этих элементов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем сущность композиционного метода расчетов 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. Как используется в расчетах регулирования стока метод статистических испытаний (метод Монте-Карло)?

Глава 10

ОСОБЕННОСТИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ДЛЯ МЕЛИОРАЦИИ

Специфика водохозяйственных расчетов при обосновании параметров водохранилищ ($V_{\text{полезн}}$, НПУ, УМО), проектируемых в узковедомственных мелиоративных целях, заключается в том, что отдача из водохранилищ, т. е. его сработка, производится только в период полива (орошения). В связи с этим обобщенные формулы для определения полезного объема водохранилища, исходящие из водоотдачи в среднем за год, не пригодны для водохранилищ сезонного регулирования стока, создаваемых в мелиоративных целях.

При наличии длительного ряда наблюдений за стоком расчет полезного объема в этом случае производится табличным способом, который сводится к решению уравнения водного баланса водохранилища по отрезкам времени Δt , как правило по месячным интервалам:

$$\pm \Delta V = W_{\text{пр}} - (W_{\text{с.п}} + W_{\text{вп}} + W_{\text{п}}), \quad (10.1)$$

где $W_{\text{пр}}$ — объем притока, м^3 ; $W_{\text{с.п}}$ — объем санитарных попусков, м^3 ; $W_{\text{вп}}$ — объем водопотребления, м^3 ; $W_{\text{п}}$ — объем потерь из водохранилища на испарение и фильтрацию, м^3 .

Балансовые расчеты проводятся по форме табл. 10.1, в кото-

Таблица 10.1

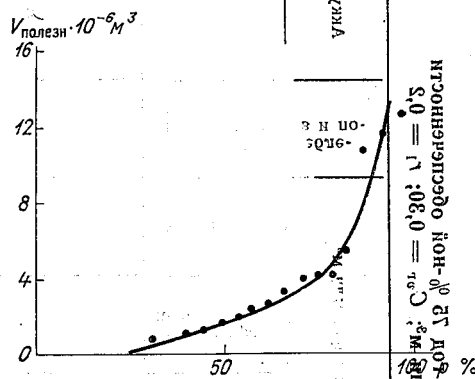
Расчет полезного объема водохранилища
 (по дефицитам притока в створе его расположения)

| Год, месяц | Приток, млн м^3 | Приток минус сан-попуск, млн м^3 | Водопотребление, млн м^3 | Потери на | | | Водопотребление плюс потери, млн м^3 | Дефицит, млн м^3 | $V_{\text{полезн}}$ (суммарный дефицит) млн м^3 |
|------------|--------------------------|---|-----------------------------------|-----------|------------------|------------------------------|---|---------------------------|--|
| | | | | испарение | | фильтрацию, млн м^3 | | | |
| | | | | мм | млн м^3 | | | | |
| 1975 | | | | | | | | | |
| IV | 13,219 | 12,819 | 0 | 3,6 | 0,007 | 0,345 | 0,352 | 12,467 | |
| V | 2,839 | 2,439 | 3,193 | 90,8 | 0,173 | 0,203 | 3,569 | -1,130 | |
| VI | 0,674 | 0,274 | 6,992 | 122 | 0,233 | 0,150 | 7,375 | -7,101 | |
| VII | 0,750 | 0,350 | 4,495 | 106 | 0,202 | 0,135 | 4,832 | -4,482 | |
| VIII | 3,374 | 2,974 | 0,294 | 73,9 | 0,141 | 0,123 | 0,558 | 2,416 | |

рой «ходом назад» от последнего месяца водопотребления рассчитываются помесечные дефициты притока в водохранилище по отношению к сумме объемов водопотребления, потерь и санитарных пусков.

Путем суммирования помесечных дефицитов определяется суммарный дефицит притока за каждый год. После ранжирования их в порядке возрастания с последующим подсчетом эмпирических обеспеченностей по формуле $p = m/(n + 1)$, где m — порядковый номер дефицита, а n — число членов ряда, строится кривая обеспеченности суммарных дефицитов стока, значения которых и определяют полезный объем водохранилища (рис. 10.1). За рас-

Рис. 10.1. Кривая обеспеченности суммарных дефицитов стока (полезных объемов водохранилища).



четный объем водохранилища принимается дефицит стока, соответствующий обеспеченности водоотдачи для целей орошения (75—85 % в зависимости от зоны расположения поливных земель).

Водоохранилища, предназначенные для орошения, создаются в большинстве случаев на малых реках. Поэтому в целях охраны их водных ресурсов санитарные пуски весной принимаются в размере не менее 20 % стока весеннего половодья обеспеченностью 95 %. Из рек, имеющих среднемесячные расходы воды в году обеспеченностью (по стоку) 95 % менее 1 м³/с, забор воды в меженный период не допускается. Санитарные пуски при этом соответствуют естественным расходам воды.

Для расчета потерь на дополнительное испарение при создании водохранилищ сезонного регулирования принимается возможный случай сочетания по климатическим условиям (разность высокого испарения с водной поверхности, обеспеченностью 25 %, и небольшого испарения с суши, обеспеченностью 75 %, отвечающей расчетной обеспеченности орошения). Мертвый объем водохранилища ($V_{\text{умо}}$) назначается из условий задержания всего твердого стока в водохранилище за период его эксплуатации, а также в ряде случаев и для обеспечения самотечной и самонапорной системы водоподачи, нормальной работы водозабора в ледовых условиях и других конструктивных особенностей. Объем

Таблица 10.2

Сезонное регулирование стока в год 75 %-ной обеспеченности
 $\bar{Q}_r = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$; $\bar{W}_r = 4,73 \text{ млн м}^3$; $C_{\text{ср}} = 0,30$; $r_1 = 0,2$

| Месяц | Приток, млн м ³ | Санитар- ные по- пуски, млн м ³ | Водопотребление, млн м ³ | | | Потери, млн м ³ | | | Сумма водопотребле- ния, санпопусков и по- терь | Аккумуляция | | Наполнение и сра- ботка водохранилища на конец месяца | |
|----------|-------------------------------|---|-------------------------------------|--------|-----------|----------------------------|--------------------|-----------|---|-------------|-------|---|---------------|
| | | | на орошение | прочее | суммарное | на испарение | на фильтра- цию | суммарные | | + | - | объем, млн м ³ | уровень, м |
| III | 0,11 | | 0 | — | 0 | | | | | | | | |
| IV | 1,91 | | 0 | — | 0 | | | | | 0,483 | | | |
| V | 0,422 | | 0,089 | — | 0,089 | 0,022 | 0,119 | 0,141 | 0,230 | 0,192 | | 0,975 | 133,80 |
| VI | 0,058 | 0,058 | 0,088 | — | 0,088 | 0,024 | 0,116 | 0,140 | 0,286 | | 0,228 | 0,747 | 133,05 |
| VII | 0,032 | 0,032 | 0,088 | — | 0,088 | 0,020 | 0,119 | 0,139 | 0,259 | | 0,227 | 0,520 | 132,44 |
| VIII | 0,019 | 0,019 | 0,089 | — | 0,089 | 0,012 | 0,119 | 0,131 | 0,239 | | 0,220 | 0,300 | 131,63 |
| Σ | 2,33 | 0,109 | 0,354 | — | 0,354 | 0,078 | 0,473 | 0,675 | 0,675 | 0,675 | 0,675 | | |

водохранилища при НПУ ($V_{\text{НПУ}}$) равен сумме $V_{\text{УМО}}$ и $V_{\text{полез}}$. Ему соответствует нормальный подпорный уровень НПУ на кривой $V = f(Z)$.

В случае отсутствия длительных наблюдений за стоком водохозяйственные расчеты проводятся по характерным годам обеспеченностью (по стоку) 50, 75, 85 и 95 %. В качестве аналогов принимаются годы с неблагоприятным внутригодовым распределением стока, в которые наблюдается наибольший дефицит стока летней межени по отношению к народнохозяйственным (санитарным) попускам в нижний бьеф и забору воды на орошение. Расчет сезонного регулирования стока в этом случае в целях выбора основных параметров водохранилища удобно вести в форме табл. 10.2, рекомендованной Ленгипроводхозом. Расчет табличным способом проводится, как правило, не в расходах соответствующих величин, а в объемах (млн м^3). Из таблицы видно, что полезный объем водохранилища соответствует объему дефицита летнего стока и равен 0,675 млн м^3 . Переход к многолетнему регулированию устанавливается по номограммам, приведенным на рис. 9.2 в зависимости от C_v , C_s , r_1 и $\beta = 0$.

Расчет параметров водохранилищ и площадей орошения при многолетнем регулировании производится по схеме, предложенной А. Н. Комаровым. Для обоснования размеров водоотдачи и ее обеспеченности, отметки НПУ выполняются водохозяйственные расчеты с последующим построением графиков связи полезной водоотдачи из водохранилища с отметками НПУ. Расчеты по установлению этой связи выполняются обобщенными приемами с использованием номограмм для определения многолетней составляющей полезного объема водохранилища.

Водопотребление для орошения переменное как внутри года, так и в разрезе многолетия. Коэффициенты корреляции между стоком и водопотреблением на орошение колеблются от 0,35 до 0,50. Для того чтобы учесть это обстоятельство, предложен прием перехода от обычной кривой $W_{\text{ор, нетто}} = f(\text{НПУ})$ к кривой $F_{\text{ор}} = f(\text{НПУ})$.

Учет переменного водопотребления по годам условно производится по вспомогательному графику связи $N_{\text{ор}} = f(\alpha)$ в различные по климатическим условиям годы (острозасушливый и средний). Для промежуточных значений α норма водопотребления на орошение устанавливается по прямой интерполяции между упомянутыми величинами. Затем путем деления объемов водоотдачи из водохранилища на оросительную норму, соответствующих одному и тому же α , определяют размер площади, которую можно орошать при любом значении НПУ. Пример расчета параметров водохранилищ и площадей орошения при многолетнем регулировании для обеспеченности орошения 75 % приведен в табл. 10.3. В таблице приняты следующие обозначения: $W_{\text{бр}}$ — объем водоотдачи из водохранилища брутто; $\bar{W}_{\text{г}}$ — средний многолетний объем стока реки; $\beta_{\text{мн}}$ — многолетняя составляющая полезного объема водохранилища в долях $\bar{W}_{\text{г}}$, определяется по номограм-

Таблица 10.3

Расчет параметров водохранилищ и площадей орошения
при многолетнем регулировании стока
 $W_r = 4,73$ млн м³; $C_{вр} = 0,30$; $C_s = 2C_{вр}$; $r_1 = 0,2$
Обеспеченность подачи воды на орошение 75 %

| α | $W_{бр} = \alpha W_r$ | Параметр водохранилища | | | | | | | | |
|----------|-----------------------|------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-------------------------------|---------------------------------|----------|--|--------------------------------|
| | | $\beta_{мн}$ | $V_{мн} = \beta_{мн} W_r$ | $V_{умо}$ | $V_{с.с}$ | $V_{полн} = V_{мн} + V_{с.с}$ | $V_{полн} = V_{полн} + V_{умо}$ | НПУ м | $Z_{ср} = f(V_{умо} + 0,5V_{полн})$ м | $F_{ср}$ млн м ² |
| | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 0,79 | 3,78 | 0 | 0 | 0,3 | 1,79 | 1,79 | 2,09 | 135,90 | 133,1 | 0,38 |
| 0,85 | 4,02 | 0,07 | 0,331 | 0,3 | 2,04 | 2,37 | 2,67 | 136,96 | 134,0 | 0,47 |
| 0,90 | 4,257 | 0,20 | 0,946 | 0,3 | 2,25 | 3,20 | 3,50 | 137,64 | 135,0 | 0,58 |

| Δh_n м | Потери | | | $W_{с.п}$ | $W_{ор.нетто} + \Delta W_{ор}$ | $N_{ор}$ м ³ /га | $F_{ор}$ га |
|----------------|--------|----------|-------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|
| | W_n | $W_{ср}$ | сумма | | | | |
| | | | | | | | |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 0,234 | 0,084 | — | 0,089 | 2,018 | 1,918 | 1772 | 1082 |
| 0,228 | 0,107 | — | 0,107 | 2,018 | 2,140 | 1650 | 1297 |
| 0,224 | 0,130 | — | 0,130 | 2,018 | 2,354 | 1610 | 1462 |

мам при заданных α ; $V_{мн}$ — абсолютное значение многолетней составляющей полезного объема водохранилища; $V_{умо}$ — мертвый объем водохранилища, соответствующий уровню мертвого объема; $V_{с.с}$ — сезонная составляющая полезного объема водохранилища, рассчитывается по годам со стоком, равным водотдаче ($V_{с.с}$ обычно рассчитывается при $\alpha = 1,0$ по году 50 %-ной обеспеченности. Расчетная точка соединяется прямой линией с точкой, соответствующей полезному объему водохранилища при годовом регулировании, $\alpha = K_{гр}$, рассчитанному по маловодному году расчетной обеспеченности — по годовому стоку и летне-осенне-зимней межени); $V_{полн}$ — полный объем водохранилища при НПУ; $Z_{ср}$ — средняя отметка наполнения водохранилища; $F_{ср}$ — средняя площадь зеркала водохранилища; Δh_n — слой дополнительного испарения из водохранилища; W_n — объем потерь на дополнительное испарение из водохранилища ($W_n = \Delta h_n F_{ср}$, где Δh_n — разности средних слоев испарения с водной поверхности

и с поверхности суши, а $F_{ср}$ — средняя площадь водной поверхности водохранилища); $W_{ф}$ — объем фильтрационных потерь из водохранилища, в рассматриваемом случае (см. табл. 10.2) $W_{ф}$ превышает объем на санитарные попуски, поэтому объем превышения $\Delta W_{ор}$ пойдет на увеличение объема на орошение; $W_{с.п}$ — объем санитарного попуска в нижний бьеф, рассчитывается по формуле $W_{с.п} = 0,2W_{в\ 95\ \%} + W_{о.=з} + W_{ф.л}$ ($W_{в\ 95\ \%}$ — объем весеннего половодья обеспеченностью 95%, $W_{о.=з}$ — объем притока в водохранилище в период осенне-зимней межени, $W_{ф.л}$ — объем

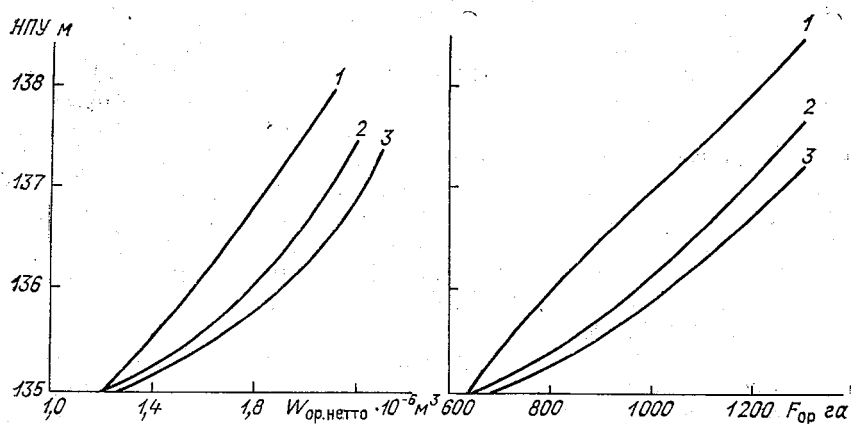


Рис. 10.2. Кривые зависимости отдачи из водохранилища от отметок НПУ.

1) $p = 95\%$; 2) $p = 85\%$; 3) $p = 75\%$.

фильтрации за 4 летних месяца), в рассматриваемом примере $W_{с.п\ 75\ \%} = 0,2 \cdot 1,74 + 0,47 + 1,20 = 2,018$; $W_{ор. нетто}$ — объем водотода на орошение, нетто, $W_{ор. нетто} = W_{бр} - W_{и} - W_{с.п}$; $N_{ор}$ — норма водопотребления, установлена в зависимости от коэффициента регулирования α ; $F_{ор}$ — площадь орошения, $F_{ор} = W_{ор. нетто} / N_{ор}$.

Аналогичным способом рассчитываются объемы и площади орошения для других обеспеченностей орошения. По данным таблицы строятся зависимости $W_{ор} = f(\text{НПУ})$ и $F_{ор} = f(\text{НПУ})$, приведенные на рис. 10.2.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем заключается специфика водохозяйственных расчетов при обосновании параметров водохранилищ, проектируемых в мелиоративных целях?
2. Как производятся в этом случае расчеты полезного объема водохранилища?
3. Что является основополагающим при назначении уровня мертвого объема?

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 $N_{ГЭС}(t)$, расходу нижнего бьефа $Q_{н.б}(t)$ или уровням бьефов — верхнего $Z_{в.б}(t)$ и нижнего $Z_{н.б}(t)$; 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) $N_{гар}(N_p)$ и располагаемая $N_{расп}$, а также средняя многолетняя годовая выработка электроэнергии $\bar{Э}_Г$. *Гарантированной, или обеспеченной, мощностью ГЭС $N_{гар}(N_p)$* 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. *Распола-*

гаемая 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

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

где $Q_{\text{ГЭС}}$ — расход воды, используемый ГЭС для получения электроэнергии, т. е. расход воды, пропускаемый через турбины ГЭС, м³/с; $H_{\text{нетто}}$ — полезный напор нетто, определяемый разностью уровней верхнего и нижнего бьефов с учетом гидравлических потерь в водопроводящих сооружениях, м; η_t — коэффициент полезного действия (к. п. д.) турбины; η_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 $\eta_t \eta_g$ заменить одним коэффициентом K_N , то средние значения коэффициента K_N для ГЭС с крупными и средними гидроагрегатами составят 8,2—8,8, для небольших 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) $\bar{\mathcal{E}}_g = 8760 \bar{N}$, где \bar{N} — среднегодовая (за многолетие) мощность, кВт; 8760 — среднее число часов в году.

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

$$N_{\text{гар}} = K_N H_{\text{нетто}} (\alpha \bar{Q}_g - q), \quad (11.4)$$

$$\bar{\mathcal{E}}_g = 8760 K_N H_{\text{нетто}} (\eta \bar{Q}_g - q), \quad (11.5)$$

где $N_{\text{гар}}$ — гарантированная мощность, кВт; $\bar{\mathcal{E}}_g$ — средняя многолетняя годовая выработка электроэнергии, кВт·ч; \bar{Q}_g — средний многолетний годовой сток, м³/с; q — потери стока в основном на испарение с водной поверхности водохранилища, м³/с; α — коэффициент регулирования стока, или водоотдача брутто из водохранилища в долях среднего многолетнего годового стока; η — коэф-

фициент, характеризующий степень использования водных ресурсов, представляет собой долю среднего многолетнего стока, используемую отраслями хозяйства. Определение этих двух важнейших характеристик регулирования речного стока подробно изложено в п. 11.6.

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:

$$Q_{н.б}(t) = Q_{вдхр}(t) + Q_{х.сбр}(t) + Q_{ф}(t) + Q_{шл}(t), \quad (11.6)$$

где $Q_{вдхр}$ — 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 создает подпор зимних уровней, распространяющийся, как правило, до створа ГЭС. Зная длину полыньи и степень уменьшения пропускной способности русла у кромки льда, оцениваемую зимним коэффициентом $K_{з.кр} = Q_з/Q_{л}$ ($Q_з$ и $Q_{л}$ — соответственно зимний и летний расходы при одном и том же уровне), с помощью методов речной гидравлики нетрудно рассчитать $K_{з.гэс}$ в створе ГЭС. С использованием $K_{з.гэс}$, 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 $Q_{ф.л} = Q_{н.б}/K_{з.гэс}$. Одна из возможных схем определения зимнего коэффициента в створе ГЭС приведена на рис. 11.1.

С использованием кривых $Q = f(Z_{н.б})$ в створах ГЭС (сечение 0) и кромки льда (сечение 1) рассчитываем и строим опорную кривую Н. М. Бернадского. При расходе $Q_{гэс}$ и известном $K_{з.кр}$ по летней кривой $Q = f(Z_{н.б})$ в сечении 1 находим зимний

уровень Z'_1 , соответствующий фиктивному летнему расходу $Q_{ф.л} = Q_{ГЭС} / K_{з.кр}$. С опорной кривой по Z'_1 и $Q_{ГЭС}^2$ снимаем подпорный уровень в створе ГЭС Z'_0 . По Z'_0 с кривой $Q = f(Z_0)$ определяем летний расход в сечении O ($Q_{л}$), а затем рассчитываем зимний коэффициент в створе ГЭС $K_{з.гэс} = Q_{ГЭС} / Q_{л}$. Подпор от кромки льда в этом случае составит $\Delta Z = Z'_0 - Z_0$.

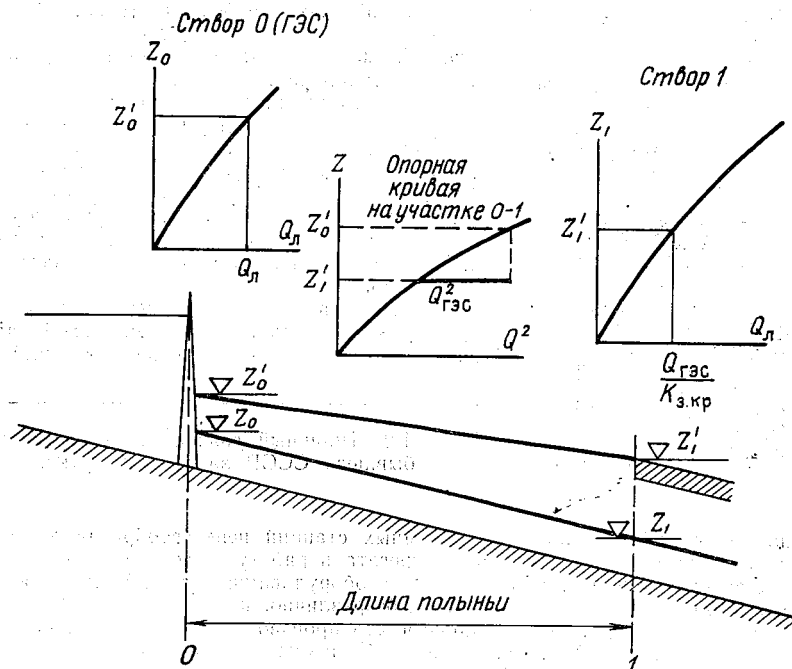


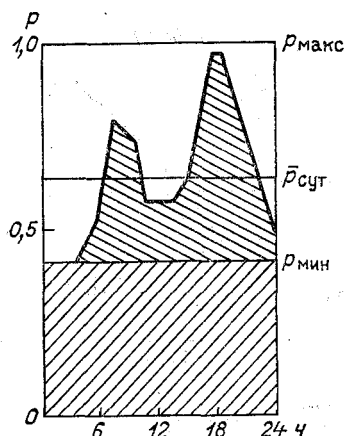
Рис. 11.1. Схема определения зимнего коэффициента в створе ГЭС.

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 (ТЭС) 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 потреби-

лей они будут различными и в зависимости от времени года. Для большинства районов бывшего СССР в зимнее время за счет возрастающей бытовой нагрузки общая за сутки нагрузка системы выше, чем летняя. Аналогичная картина и в экстремальных значениях нагрузки (максимальная нагрузка в зимние сутки, а минимальная — в летние). На рис. 11.2 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} — *пиковая*. 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.

Рис. 11.2. Типичный график нагрузки центра бывшего СССР за зимние сутки.

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 производить 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.

В многоводные 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 гидроэлектростанций и тепловых станций 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).

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 во-

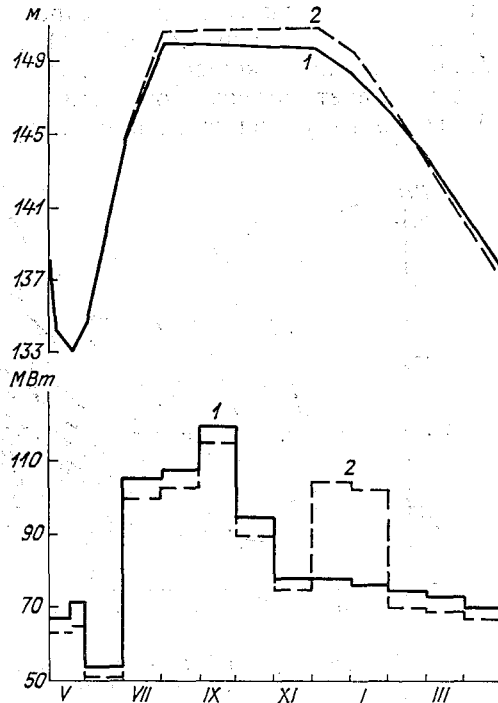


Рис. 11.3. График изменения мощностей ГЭС и уровней водохранилища при изолированной (1) работе ГЭС и при ее совместной (2) работе с ПЭС.

дохранилища 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 сбрасываются. На рис. 11.3 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.

11.3. Характеристика гидросилового оборудования ГЭС и понятие установленной мощности

Условия и режим работы ГЭС во многом зависят от эксплуатационной характеристики гидроагрегатов (рис. 11.4). 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. 11.4.

Суммарный расход через ГЭС равен $Q_{ГЭС} = Q_{ан}$, 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 линии 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

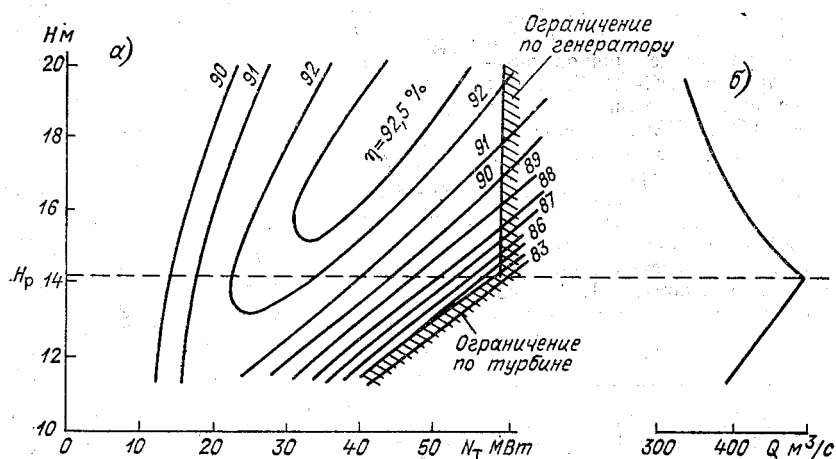


Рис. 11.4. Эксплуатационная характеристика гидроагрегата (а) и кривая его пропускной способности (б).

ваются *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:

$$N_{уст} = N_{г}n,$$

где $N_{г}$ — 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 $\mathcal{E}_{г}$ к установленной мощности $N_{уст}$: $T_{уст} = \mathcal{E}_{г}/N_{уст}$.

11.4. Расчеты к обоснованию параметров водохранилищ и ГЭС обобщенными приемами

Водноэнергетические расчеты для обоснования параметров водохранилища и ГЭС заключаются в последовательном определении для ряда заданных вариантов НПУ (нормальный подпорный уровень) оптимальных уровней сработок УМО (уровень мертвого объема) и соответствующих им гарантированной (обеспеченной) мощности $N_{\text{гар}}$, годовой выработки электроэнергии \mathcal{E}_r , располагаемой и установленной мощностей $N_{\text{расп}}$ и $N_{\text{уст}}$. В дальнейшем обосновывается сама отметка НПУ путем сопоставления технико-экономических показателей вариантов НПУ при выбранных для каждого из них УМО, $N_{\text{гар}}$, $N_{\text{расп}}$, $N_{\text{уст}}$ и \mathcal{E}_r .

Построение зависимости водо- и энергоотдачи пионерного гидроузла от отметки НПУ и глубины сработки водохранилища для выбора параметров установки на начальных этапах проектирования целесообразно выполнять обобщенными приемами.

Эти приемы позволяют определить полезный объем водохранилища либо непосредственно (Ш. Ч. Чокин, В. Д. Киктенко, Б. Б. Баишев), либо как сумму отдельно вычисляемых многолетней и сезонной составляющих регулирующего объема. В проектной практике значительно больше распространен второй способ. Многолетняя составляющая полезного объема водохранилища $V_{\text{мин}}$ при этом определяется с помощью номограмм Я. Ф. Плешкова и И. В. Гуглия, А. Ш. Резниковского и В. В. Зубарева (номограммы Энергосетьпроекта), связывающих относительную водоотдачу водохранилища α и ее обеспеченность с коэффициентом изменчивости годового стока $C_{\text{ог}}$ для разных значений коэффициента корреляции r_1 .

Расчет и построение обобщенной водохозяйственной характеристики. Обобщенная водохозяйственная характеристика связывает относительный коэффициент регулирования α (гарантированная отдача брутто $Q_{\text{гар}}$ в долях нормы годового стока Q_r) заданной обеспеченности p и необходимый для его поддержания полезный объем водохранилища $V_{\text{полезн}}$ или в абсолютных значениях $Q_{\text{гар}} = f(V_{\text{полезн}})$. Расчет зависимости $\alpha = f(V_{\text{полезн}})$ производится по форме табл. 11.1 и 11.2. При этом полезный объем водохранилища в зоне сезонного регулирования (в пределах до $\alpha \leq K_{\text{гр}}$) определяется по формулам (8.2) и (8.3) или, как в табл. 11.2, принимается равным дефициту стока межени до заданного гарантированного расхода $Q_{\text{гар}}$ обеспеченностью p . В пределах многолетнего регулирования стока ($K_{\text{гр}} < \alpha \leq 1,0$) сезонная составляющая полезного объема водохранилища рассчитывается по формуле (9.10) или в определенных условиях по формуле (9.12), а в случае наличия длительного ряда наблюдений — как дефицит стока межени до гарантированного расхода (αQ_r) года со среднегодовым расходом, равным водоотдаче (αQ_r). Многолетняя составляющая полезного объема водохранилища находится по номограммам Я. Ф. Плешкова, И. В. Гуглия или Энер-

Таблица 11.1

Расчет обобщенной водохозяйственной характеристики в створе ГЭС ($\alpha = f(V_{\text{полезн}}$)

| α | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------|---|---------------------|-----------------------|------------------------------------|--|---|------------------------|---|---|---|
| | | $\beta_{\text{МН}}$ | $\alpha t_{\text{М}}$ | $\bar{m}_{\text{М}} K_{\text{МР}}$ | $\beta_{\text{сез}} = \text{гр. 3} - \text{гр. 4}$ | $\frac{1 - K_{\text{МР}}}{1 - K_{\text{ГР}}}$ | (гр. 6) $(1 - \alpha)$ | $\beta_{\text{с.с}} = \text{гр. 3} - \bar{m}_{\text{М}} + \text{гр. 7}$ | $\beta_{\text{полезн}} = \beta + \beta_{\text{МН}}$ | $V_{\text{полезн}} = \beta_{\text{полезн}} \bar{W}_{\text{Г}}$ км ³ |
| 1 | | | | | | | | | | |

Таблица 11.2

Расчет обобщенной водохозяйственной характеристики в створе ГЭС ($\alpha = f(V_{\text{полезн}}$)

| α | 1 | 2 | Полезный объем водохранилища при сезонном регулировании | | Сезонная составляющая полезного объема водохранилища | | | | 10 | 11 | |
|----------|---|---------------------|---|---|--|-----------------------|---|------------------------|---|---|---|
| | | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | | | 9 |
| | | $\beta_{\text{МН}}$ | $Q_{\text{ГР}} = \alpha \bar{Q}_{\text{Г}}$ | $\Sigma Q_{\text{деф}} \times 2,68 \cdot 10^6$ км ³ | $\beta_{\text{сез}} = V_{\text{сез}} \bar{W}_{\text{Г}}$ | $\alpha t_{\text{М}}$ | $\frac{1 - K_{\text{МР}}}{1 - K_{\text{ГР}}}$ | (гр. 7) $(1 - \alpha)$ | гр. 6 - $\bar{m}_{\text{М}} + \text{гр. 8}$ | $\beta_{\text{полезн}} = \beta + \beta_{\text{МН}}$ | $V_{\text{полезн}} = \beta_{\text{полезн}} \bar{W}_{\text{Г}}$ км ³ |
| 1 | | | | | | | | | | | |

Примечание. Под β в гр. 9 табл. 11.1 и в гр. 10 табл. 11.2 понимается $\beta_{\text{сез}}$ — для сезонного регулирования и $\beta_{\text{с.с}}$ — для многолетнего регулирования.

госетьпроекта (см. рис. 9.2) в зависимости от значения коэффициента корреляции r_1 и соотношения между C_s и C_v (подробнее о расчете составляющих $V_{\text{полезн}}$ см. гл. 8 и 9). По результатам расчетов строится зависимость $\alpha = f(V_{\text{полезн}})$ (см. рис. 9.6).

Расчеты к выбору уровня сработки водохранилища (УМО) и соответствующих ему гарантированной водоотдачи и средней многолетней выработки энергии. В целях определения оптимального УМО водохранилища для каждого варианта НПУ рассчитывается и строится зависимость гарантированной (обеспеченной) мощности $N_{\text{гар } i}$ и средней многолетней годовой выработки энергии $\mathcal{E}_{\text{Г}i}$ от уровня сработки водохранилища $Z_{\text{срб } i}$. Эти зависимости рассчитываются по форме табл. 11.3, в которой дан пример расчета для одного из заданных вариантов НПУ.

Глубина сработки водохранилища задается в пределах от h_i , близкой к нулю, до $h_i \leq 1/3 H_{\text{макс}}$ с интервалами 2—5 м и более в зависимости от $H_{\text{макс}}$ — максимального напора при НПУ. По кривой $V = f(Z)$ находим объем водохранилища при этих глубинах сработки $V_{Z_{\text{срб } i}}$ и по разности $V_{\text{НПУ}}$ и $V_{Z_{\text{срб } i}}$ — полезный объем водохранилища $V_{\text{полезн } i}$. Пользуясь кривой $\alpha = f(V_{\text{полезн}})$, по значению $V_{\text{полезн } i}$ снимаем соответствующее значение α_i и вычисляем зарегулированные гарантированные расходы брутто $Q_{\text{бр } i} = \alpha_i \bar{Q}_{\text{Г}}$. Вычитая из последних потери расходов q (на испарение, фильтрацию и т. д.), определяем используемые на ГЭС гарантированные расходы нетто $Q_{\text{гар } i}$.

Средние напоры на ГЭС находим по разности средних уровней верхнего (водохранилища) и нижнего бьефов. Уровень верхнего бьефа для подсчета $N_{\text{гар}}$ берется при среднем наполнении, т. е. при $V_{Z_{\text{ср}}} = V_{Z_{\text{срб}}} + 0,5V_{\text{полезн}}$. Уровень нижнего бьефа находим как полусумму летнего и зимнего уровней, пользуясь кривой $Q = f(Z_{\text{н.б}})$ при $Q_{\text{н.б}}$, определяемом по формуле (11.6). При таком подходе к определению $Z_{\text{н.б}}$ не учитывается влияние неустановившегося движения воды при суточном регулировании мощности ГЭС. На начальных стадиях проектирования это считается допустимым, так как выбор параметров осуществляется поращениям энергоотдачи ($\Delta N_{\text{гар } i}$ и $\Delta \mathcal{E}_{\text{Г}i}$). Однако в практике проектных и научно-исследовательских институтов влияние суточного регулирования мощности на ГЭС подлежит обязательному учету. По рекомендациям Гидропроекта, возможное повышение уровня нижнего бьефа при суточном регулировании мощности можно учесть по эмпирической формуле С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля:

$$Z_{\text{н.б}} = \xi \bar{Z} + (1 - \xi) Z_{\text{макс}}, \quad (11.8)$$

где ξ — коэффициент, изменяющийся от 0,7 при более плотном графике нагрузки до 0,3 при менее плотном, в первом приближении $\xi = 0,5$; \bar{Z} — уровень нижнего бьефа, соответствующий по кривой $Q = f(Z_{\text{н.б}})$ среднему за сутки расходу воды; $Z_{\text{макс}}$ — максимальный уровень, который был бы достигнут при длительной работе с максимальной нагрузкой.

Расчет к выбору оптимального уровня сработки водохранилища (УМО) ГЭС, гарантированной мощности $N_{гар}$ и среднегодовой выработки энергии E_r

| 1 | Глубина сработки $h_{срб}$ м | 3 | Объем водохранилища, км ³ | | 6 | 7 | Среднее наполнение водохранилища км ³ | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|---|---|-----------------------|-----------------------|
| | | | $V_{УМО}$ | $V_{полезн}$ | | | для $N_{гар}$ | для E_r | |
| 530; 25,82 | 30 40 ... | 500 490 ... | 16,0 13,64 ... | 9,82 12,18 ... | 0,600 0,68 ... | 0,928 0,947 ... | 20,91 19,73 ... | 22,87 22,17 ... | |
| Расход воды, м ³ /с | | | | | | | | | |
| 10 | гарантированный брутто αQ_r | потери q | гарантированный нетто $Q_{гар}$ | используемый на ГЭС | | гарантированные | | средние | |
| | | | | брутто ηQ_r | нетто $Q_{исп}$ | $Z_{в.б}$ | $Z_{н.б}$ | $Z_{в.б}$ | $Z_{н.б}$ |
| 888 1006 ... | 8 9 ... | 880 997 ... | 1373 1402 ... | 13 14 ... | 1367 1396 ... | 517,3 513,5 ... | 325,0 325,1 ... | 525,2 522,9 ... | 325,2 325,3 ... |
| Напоры, м | | | | | | | | | |
| 19 | гарантированный брутто | потери | гарантированный нетто $H_{гар}$ | средний нетто $H_{ср}$ | | Гарантированная мощность $N_{гар}$ тыс. кВт | Среднегодовая выработка энергии E_r млрд. кВт·ч | | |
| | | | | $H_{гар}$ | $H_{ср}$ | | 23 | 24 | |
| 192,3 188,4 ... | 190,2 186,8 ... | 2,1 1,6 ... | 197,8 196,0 ... | 1523 1695 ... | 21,57 21,81 ... | 1523 1695 ... | 21,57 21,81 ... | ... | |

Наиболее простым и достаточно надежным способом учета суточных колебаний уровней в нижних бьефах ГЭС является нахождение уровней нижнего бьефа по кривой $Q = f(Z_{н.б})$, соответствующих средневзвешенному расходу $Q_{ср. взв}$:

$$Q_{ср. взв} = \sqrt[3]{(Q_1^3 T_1 + Q_2^3 T_2) / (T_1 + T_2)}, \quad (11.9)$$

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. Подсчет гарантированных мощностей производится по формуле

$$N_{гар} = K_N Q_{гар} H_{гар}. \quad (11.10)$$

В таблице K_N принято равным 9,1.

Параллельно производятся расчеты по определению среднегодовой выработки энергии ГЭС в зависимости от уровней сработки водохранилища.

Определенную трудность представляет подсчет среднего расхода воды, используемого на ГЭС, определяемого по формуле $\bar{Q}_{исп} = \eta \bar{Q}_г$, где η — коэффициент использования стока, $\bar{Q}_г$ — средний многолетний расход воды в створе ГЭС. Коэффициент η зависит от коэффициента α (или от $V_{полезн}$) и максимальной пропускной способности ГЭС (при $N_{уст}$) Q_v . Его можно определить по специально разработанной номограмме, представляющей собой зависимость коэффициента $\eta = \bar{Q}_{исп} / \bar{Q}_г$ от коэффициента турбинного расхода $\delta = N_{уст} / N_{гар}$ и коэффициента $\alpha = Q_{гар} / \bar{Q}_г$ (рис. 11.5). Коэффициент δ удобнее рассчитывать по выражению $\delta = 8760 / (T_{уст} \alpha)$.

Средний напор для подсчета $\mathcal{E}_г$ определяется при среднем наполнении водохранилища $V_{z_{ср}} = V_{z_{срб}} + 0,7 V_{полезн}$. Выработка энергии подсчитывается по формуле (11.5). По данным таблицы строятся зависимости $N_{гар i} = f(Z_{срб})$ и $\mathcal{E}_{г i} = f(Z_{срб})$ (рис. 11.6). За оптимальный уровень сработки водохранилища следует принять уровень, которому соответствуют максимальные значения $N_{гар}$ и $\mathcal{E}_г$. В целях выбора УМО, $N_{гар}$ и $\mathcal{E}_г$ часто прибегают к анализу приращений $N_{гар i}$ и $\mathcal{E}_{г i}$ при переходе от одного уровня сработки к другому и на границе уменьшения этих приращений принимают расчетный УМО при заданном НПУ. Принятые УМО для заданных вариантов НПУ на рис. 11.6 соединены пунктирной линией.

Окончательный выбор НПУ и глубины сработки водохранилища производится на основе технико-экономического обоснования с учетом широкого спектра экологических последствий.

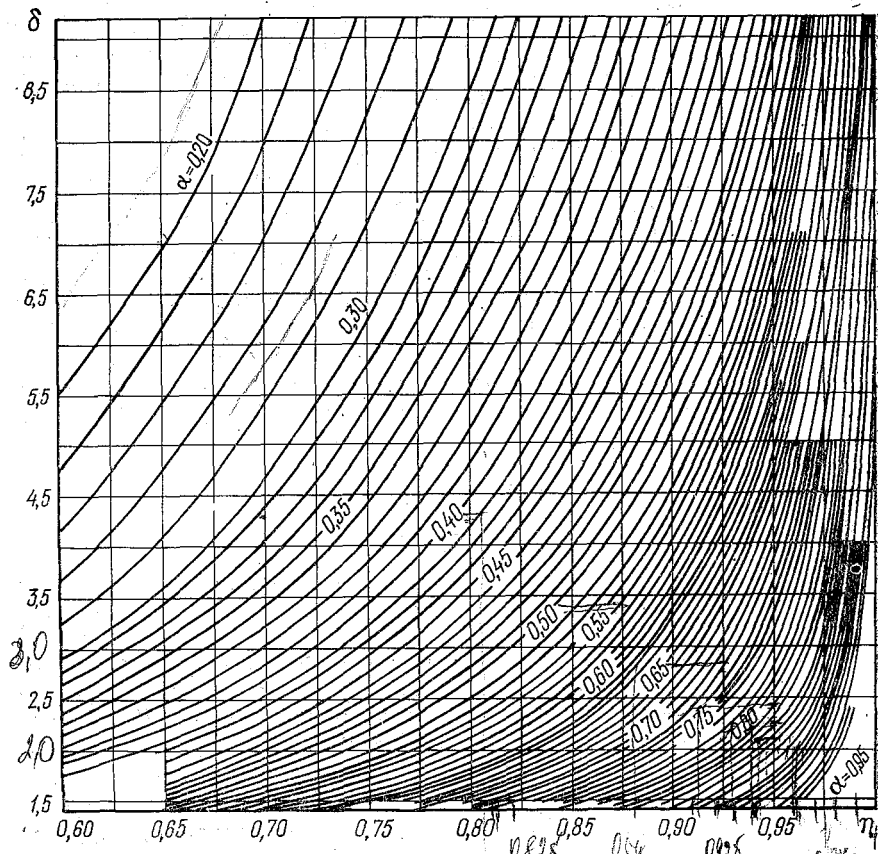


Рис. 11.5. Зависимость коэффициента использования η от коэффициента производительности установки δ и коэффициента регулирования α .

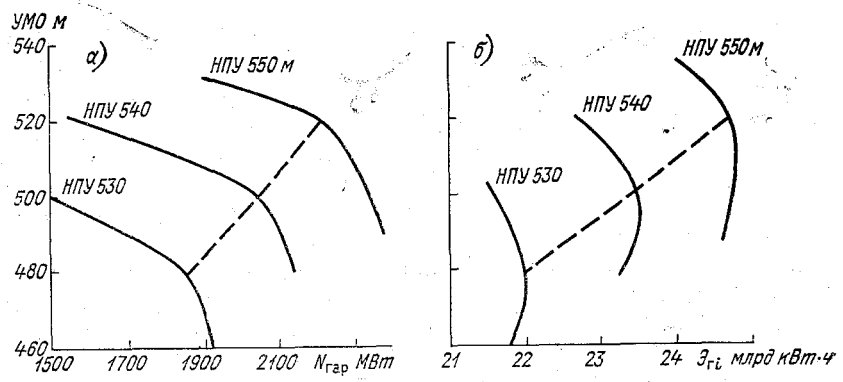


Рис. 11.6. Зависимость гарантированной мощности и среднегодовой выработки энергии ГЭС от отметок НПУ и УМО водохранилища.

Надо иметь в виду, что в отдельных случаях из-за недостатка исходных данных построить указанные зависимости не представляется возможным. В таких случаях глубину сработки водохранилища рекомендуется принимать равной не более одной трети максимального напора на ГЭС.

Для последующего обоснования оптимального НПУ часто прибегают к построению зависимостей, приведенных на рис. 11.7.

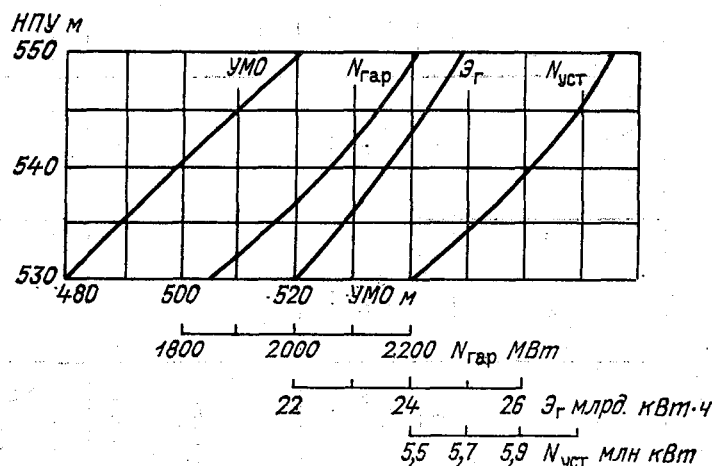


Рис. 11.7. Зависимость гарантированной мощности ($N_{\text{гар}}$), среднегодовой выработки энергии (\mathcal{E}_g) и установленной мощности ($N_{\text{уст}}$) от НПУ и УМО водохранилища.

11.5. 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. Водохозяйственные и водноэнергетические расчеты рекомендуется вести по форме табл. 11.4, представляющей собой табл. 8.3, дополненную графами, в которых дается характеристика напоров и мощностей ГЭС в i -м расчетном интервале времени. Основными исходными данными для водохозяйственных и водноэнергетических расчетов по календарным стоковым рядам 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 (турбин, генераторов) в виде зависимостей от напора их коэффициентов полезного действия, мощностей и расходов воды, а также характеристика потерь напора.

Все водохозяйственные и водноэнергетические расчеты проводятся применительно к определенным правилам управления водными ресурсами водохранилищ, исходя из обеспечения постоянной гарантированной мощности ($N_{гар}$), определенной предварительно обобщенными методами (подробно см. п. 11.6). При неизвестном наполнении водохранилища на конец расчетного интервала времени Δt_i , а следовательно, и напора \bar{H}_i расчеты проводятся методом последовательного приближения (подбора). Подбор значений всех элементов режима работы водохранилища и ГЭС в каждом интервале i при известных $\bar{Q}_{ест\ i}$, $V_{нач\ i}$ 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} , $Z_{в.б(i+1)}$, $\bar{Z}_{в.б\ i}$, $\bar{Z}_{н.б\ i}$, $\bar{H}_{бр\ i}$, $h_{лi}$, $\bar{H}_{нетто\ i}$;
- 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 $N_{гар}$, 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 ($\bar{Q}_{ГЭС\ i}$), приведенным в графе 9 табл. 11.4, 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 $(0,7-0,8)Q_{макс}$ (подробно см. п. 11.4). Весной, когда $Q_{зар} > Q_{ср.взв}$, $Z_{н.б}$ определяется соответствующими $Q_{зар}$.

Специалисты Гидропроекта, как указывалось выше, рекомендуют определять уровни нижнего бьефа с учетом суточных ко-

лебаний по эмпирической формуле (11.8). Однако из-за приближенных значений ζ в ряде случаев возможно отклонение уровней нижнего бьефа от фактических.

По данным регулирования за длительный период строят хронологические графики наполнений водохранилища, естественных и зарегулированных расходов (с выделением расходов ГЭС),

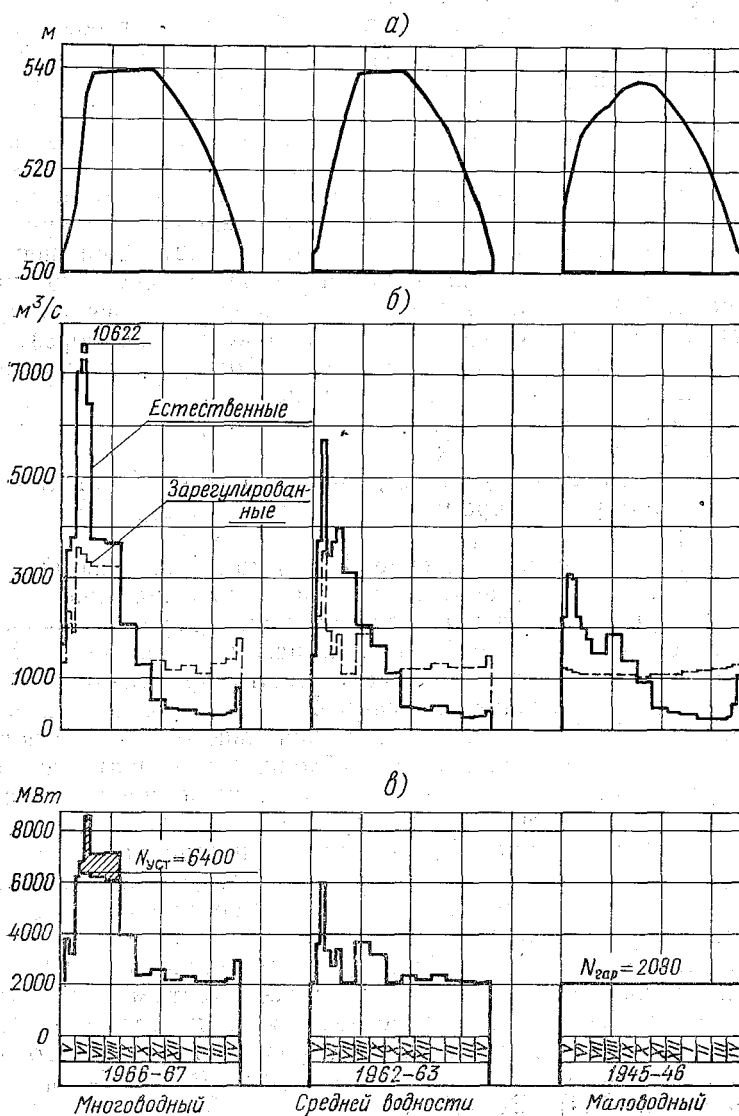


Рис. 11.8. Хронологические графики уровней водохранилища (а), расходов воды (б) и мощностей ГЭС (в) за характерные по водности годы.

а также напоров и мощностей ГЭС, вид которых по характерным (по водности) годам дан на рис. 11.8.

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. 11.9). По результатам табличных

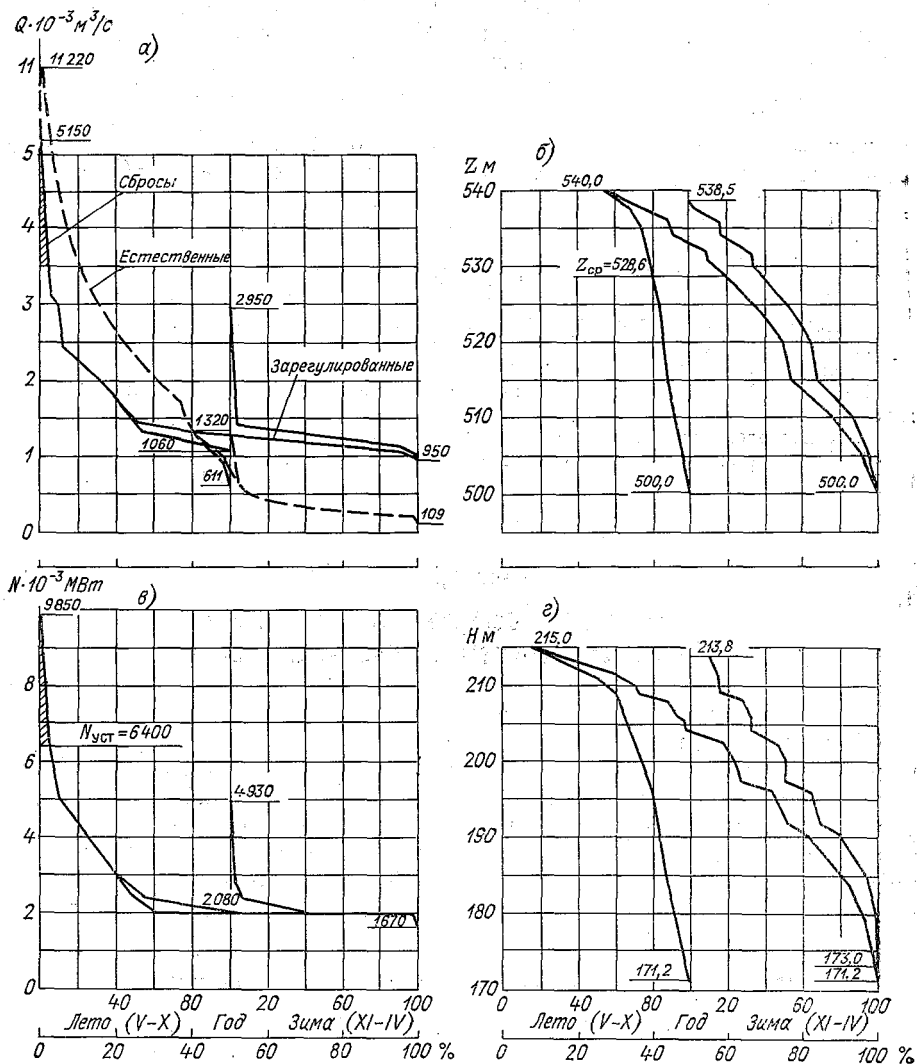


Рис. 11.9. Кривые продолжительности основных характеристик зарегулированного режима гидроузла за период с 1908-09 по 1966-67 г.

а — расходы воды, б — уровни воды в водохранилище, в — мощности, г — напоры.

расчетов регулирования стока производится подсчет средней многолетней годовой выработки электроэнергии за длительный расчетный ряд лет

$$\bar{\mathcal{E}}_r = (730,5 \sum N_i) / n, \quad (11.11)$$

где $\bar{\mathcal{E}}_r$ — средняя многолетняя годовая выработка электроэнергии, кВт·ч; $\sum N_i$ — 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 $\sum N_i$ по водотоку (графа 21 табл. 11.4)), то получим годовую выработку электроэнергии по водотоку $\bar{\mathcal{E}}_{г. вод.}$, а если подставить $\sum N_i$ с ограничением по $N_{уст}$ (графа 22) — годовую выработку электроэнергии ГЭС — $\bar{\mathcal{E}}_{г. ГЭС}$. При этом коэффициент использования стока на ГЭС $\eta = \bar{\mathcal{E}}_{г. ГЭС} / \bar{\mathcal{E}}_{г. вод.}$

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. Какие Вы знаете методы определения водноэнергетических характеристик?
5. Какие электростанции входят в энергосистемы?
6. Какова роль гидроэлектростанций в энергосистемах?

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; длительность периода сработки водохранилища многолетнего регулирования стока и т. п.

12.1. Первоначальное наполнение водохранилища и режим работы ГЭС

Расчеты первоначального наполнения водохранилища выполняются, как правило, применительно к многоводным, средним и маловодным условиям. По многоводным условиям устанавли-

ваются темпы роста подпорных сооружений, по средним и маловодным — водноэнергетические показатели ГЭС в период до подъема уровня верхнего бьефа (водохранилища) до проектных отметок. Данный период работы сооружений гидроузла принято называть *периодом его временной эксплуатации*. Для периода временной эксплуатации обычно определяются, кроме режима уровней водохранилища, следующие водноэнергетические показатели ГЭС: годовая выработка электроэнергии в средних по водности условиях; годовая и месячные выработки (мощности) в расчетных маловодных условиях (90 или 95 %-ной обеспеченности), располагаемая по напору мощность в расчетных маловодных условиях.

Длительность первоначального наполнения водохранилища зависит от его объема и предстоящих гидрологических условий и может измеряться месяцами или годами.

Расчеты первоначального наполнения водохранилища выполняются балансовым методом по смоделированным рядам расходов воды различной обеспеченности. Этот метод используется для крупных водохранилищ, наполнение которых можно осуществить за несколько лет. В случае небольшого объема водохранилищ расчеты обычно проводятся по характерным (по водности) годам.

При моделировании теоретического маловодного периода 90 или 95 %-ной обеспеченности из n лет коэффициент изменчивости стока n -летия C_{vn} определяется по формуле С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля:

$$C_{vn} = \frac{C_{vg}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2r_1}{n(1-r_1)} \left(n - \frac{1-r_1^n}{1-r_1} \right)}, \quad (12.1)$$

где C_{vg} — 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

$$C_{vn} = C_{vg} / \sqrt{n}.$$

Таблица 12.1

Подсчет теоретического маловодного периода 95 %-ной обеспеченности
 $\bar{Q}_T = 3570 \text{ м}^3/\text{с}$; $C_{vg} = 0,15$; $r_1 = 0,3$; $C_s/C_v = 2$

| Продолжительность периода наполнения n лет | C_{vn} по формуле (12.1) | Модульный коэффициент обеспеченностью 95 % $K_{95} \%$ | Средний расход воды обеспеченностью 95 % | | |
|--|----------------------------|--|---|--|---|
| | | | n -летия $Q_{95} \% = \bar{Q}_T K_{95} \%$ | суммарный за n -летие $Q_{95} \% n$ | n -го года n -летия $Q_n = Q_{95} \% n - Q_{95} \% \times (n-1)$ |
| 1 | 0,15 | 0,77 | 2750 | 2750 | 2750 |
| 2 | 0,12 | 0,81 | 2890 | 5780 | 3030 |
| · | · | · | · | · | · |
| · | · | · | · | · | · |

Подсчет теоретического маловодного периода обеспеченностью 90 или 95 % производится по форме табл. 12.1.

Средневодный период в n лет представляет собой повторение средневодного года.

Для проведения расчетов первоначального наполнения водохранилища из ряда наблюдений за стоком отбирают годы со среднегодовыми расходами Q_i , близкими к $\bar{Q}_Г$ и $\bar{Q}_н$, а затем приводят их к $\bar{Q}_Г$ и $\bar{Q}_н$ путем умножения среднемесячных расходов модели на соответствующие коэффициенты ($K_{ср} = \bar{Q}_Г/Q_i$, $K_n = \bar{Q}_н/Q_i$).

Водохозяйственные и водноэнергетические расчеты в период первоначального наполнения по смоделированным рядам проводятся по форме табл. 12.2. В дополнение к ней необходимо учи-

Таблица 12.2

Первоначальное наполнение водохранилища
Средневодные условия

| Год | Месяц Δt | Расход воды, м ³ /с | | | | Объем, км ³ | |
|------|------------------|--------------------------------|---------------|--|--|--|--|
| | | приток $Q_{пр}$ | ГЭС $Q_{ГЭС}$ | суммарный через ГЭС и водосбор $Q_{сбр}$ | аккумуляция $Q_{акк} = Q_{пр} - Q_{сбр}$ | аккумуляция $V_{акк} = Q_{акк} \Delta t$ | наполнения (на конец Δt) $V_k = \sum V_{акк}$ |
| 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 | 53,04 |

| Уровень воды, м | | нижнего бьефа $Z_{н.б}$ | Напор нетто $H_{нетто} = Z_{ср} - Z_{н.б} - \Delta h$ | K_N | Мощность $N = K_N Q_{ГЭС} H_{нетто}$ МВт | Годовая выработка электроэнергии $\mathcal{E}_Г$ млрд кВт·ч |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|---|-------|--|---|
| на конец Δt Z_k | на середину Δt $Z_{ср}$ | | | | | |
| 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 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 |

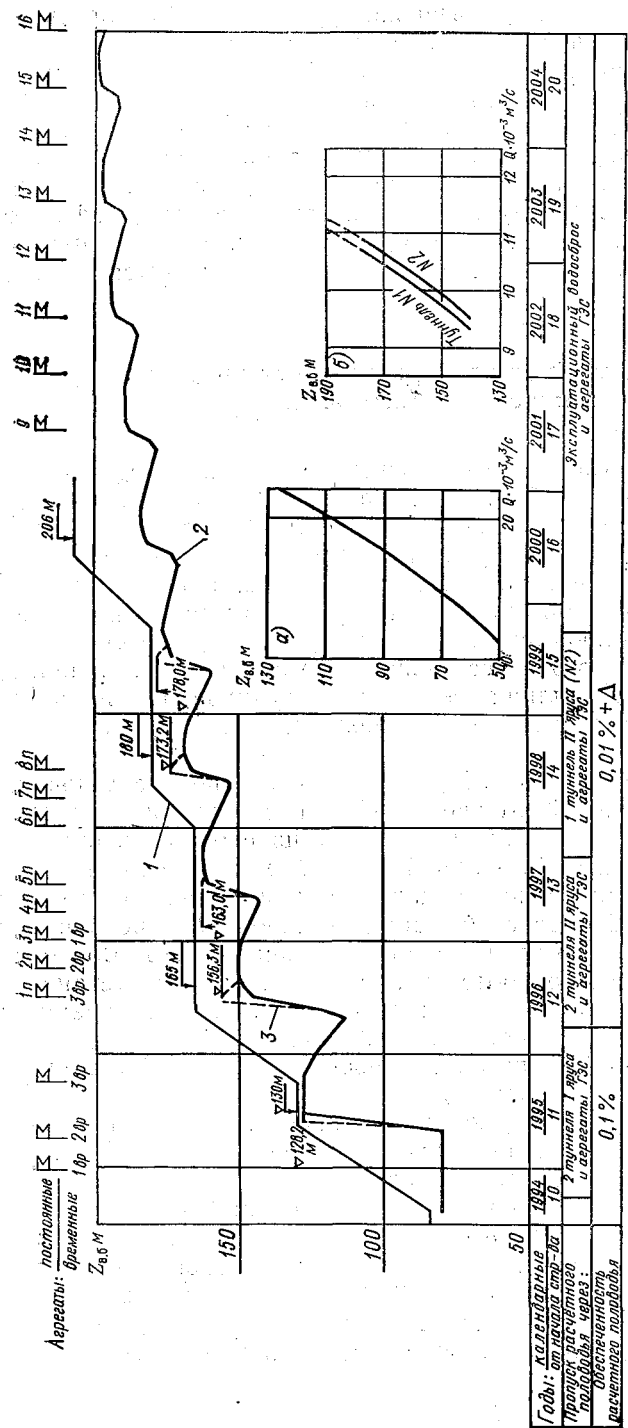


Рис. 12.1. Исходные данные для расчета первоначального наполнения и уровней водохранилища в этот период.

1 — график предполагаемого роста напорного фронта; 2 — ход уровней водохранилища в средневодных условиях; 3 — то же при пропуске расчетных половодий. а — пропускная способность туннелей I яруса; б — пропускная способность туннелей II яруса.

тывать затраты воды на насыщение грунтов ложа и бортов водохранилища при его первоначальном наполнении.

Исходными данными для подобных расчетов кроме гидрологических являются: график предполагаемого роста напорного фронта, сроки ввода строительных водосбросов (туннелей) и гидроагрегатов; пропускная способность строительных туннелей и эксплуатационные характеристики гидроагрегатов в зоне пониженных напоров. По результатам расчета строится график хода уровней водохранилища, приведенный на рис. 12.1. Пропуск расчетных половодий в годы строительства производится по схеме, изложенной в гл. 15.

12.2. Отдача из водохранилища за пределами расчетной обеспеченности

За пределами расчетной обеспеченности отдачи $p\%$ 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 α 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. Водоотдача за пределами расчетной обеспеченности может быть установлена по кривой обеспеченности, отражающей работу водохранилища в течение длительного периода. В. А. Бахтиаров предложил следующий упрощенный способ построения кривой обеспеченности в зоне перебоев водоотдачи.

Сразу после сработки водохранилища (по истечении критического периода) равновероятно появление любого года — от крайне маловодного до крайне многоводного. Но в данном случае интерес представляют лишь годы, сток которых меньше α , находящиеся на кривой обеспеченности стока (рис. 12.2) от p_α до 100%. Если этот участок кривой отнести к основанию, равному вероятности перебойных лет ($100 - p$), и пристроить его к заданной кривой обеспеченности отдачи, получим полную кривую обеспеченности отдачи (кривая 3), включающую в себя и перебойную зону.

Глубина перебоев (дефицит отдачи) равна разности $\alpha - K$, где K — ордината перебойного участка кривой 3.

Практически построение участка обеспеченности отдачи в зоне перебоев сводится к пересчету абсцисс участка кривой обеспеченности стока с $K < \alpha$ по формуле

$$p_i = p + \frac{100 - p}{n} i = p + A', \quad (12.2)$$

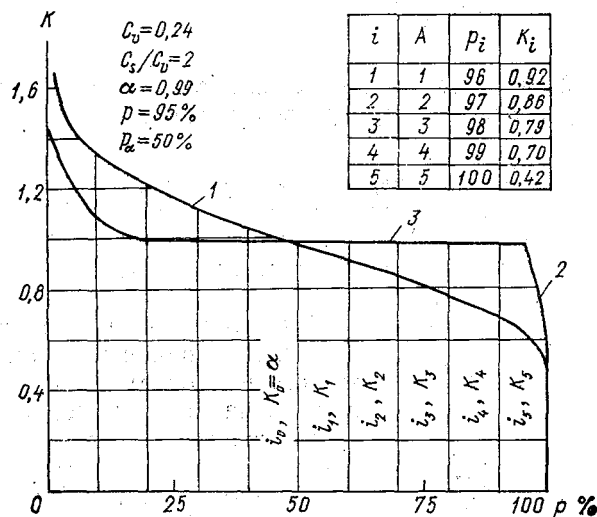


Рис. 12.2. Схема расчета кривой обеспеченности водоотдачи в зоне перебоев.

1 — кривая обеспеченности стока; 2 — кривая обеспеченности водоотдачи за пределами расчетной обеспеченности; 3 — полная кривая обеспеченности водоотдачи.

где p — обеспеченность бесперебойной водоотдачи; n — число равных отрезков, на которые делится участок оси абсцисс в пределах $p_\alpha - 100\%$ ($n = 4 \dots 5$); i — номер ординаты кривой обеспеченности стока в местах деления ($i = 0$ при обеспеченности p_α , $i = n$ в конце кривой); p_i — обеспеченность i -й ординаты перебойного участка, равной i -й ординате кривой обеспеченности стока.

Регламентация водоотдачи в закритических условиях позволяет избежать глубоких перебоев водообеспечения участников водохозяйственного комплекса. 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*:

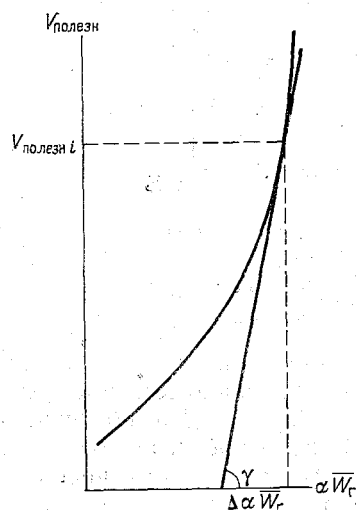
$$p' = p_{\text{норм}} + (p_{\text{сн}} - p_{\text{норм}}) \alpha_{\text{сн}} / \alpha_{\text{норм}}, \quad (12.3)$$

где p' , $p_{\text{норм}}$, $p_{\text{сн}}$ — обеспеченности соответственно приведенной, нормальной и сниженной водоотдачи; $\alpha_{\text{норм}}$ и $\alpha_{\text{сн}}$ — 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 (12.3) определяют p' , а затем с известных номограмм по $\alpha_{\text{норм}}$ и p' снимают объем водохранилища, необходимый для поддержания сниженной водоотдачи заданной обеспеченности.

12.3. Длительность периода сработки водохранилища многолетнего регулирования стока

Под *длительностью периода сработки водохранилища* понимается срок, в течение которого наполненное до НПУ водохранилище опорожняется до УМО. При этом нужно иметь в виду длительность сработки только многолетней составляющей полезного объема водохранилища.



Длительность периодов сработки связана с водностью притока в водохранилище, от степени которой в одном случае оно может опорожниться сравнительно быстро (в течение одного года), в другом — в течение нескольких следующих друг за другом маловодных лет. Поэтому нельзя говорить о какой-то определенной длительности сработки водохранилища заданного объема, а можно говорить лишь о его наиболее вероятном значении.

Рис. 12.3. Определение длительности сработки водохранилища с использованием зависимости $V_{\text{полезн}} = f(\alpha W_r)$.

Вопрос о длительности сработки водохранилища изучали многие авторы: С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель, Я. Ф. Плешков, Г. П. Иванов и другие. Так, в частности, С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкелем построены кривые наиболее вероятных периодов сработки $n = \varphi(\beta_{\text{мн}}, \alpha)$ по трем значениям $S_{\text{ог}}$, равным 0,60, 0,40, 0,20, и трем значениям α , равным 0,60, 0,80 и 0,95. Указанный диапазон $S_{\text{ог}}$ и α был существенно расширен Я. Ф. Плешковым.

Наиболее вероятную длительность сработки водохранилища можно определить и по так называемой *обобщенной водохозяйственной характеристике*, представляющей собой зависимость ко-

эфициента регулирования стока от полезного объема водохранилища ($\alpha = f(V_{\text{полезн}})$).

Перестроив зависимость $\alpha = f(V_{\text{полезн}})$ в зависимость вида $V_{\text{полезн}} = f(\alpha \bar{W}_r)$, проведем к ней касательную в точке заданного, или расчетного $V_{\text{полезн}}$. Числовое значение тангенса угла наклона касательной к оси абсцисс соответствует периоду сработки полезного объема водохранилища T . Это видно из рисунка 12.3, где $\text{tg } \gamma = V_{\text{полезн}} / (\Delta \alpha \bar{W}_r) \cong T$ (в годах).

Аналогичные расчеты проведены и на номограммах Г. П. Иванова (см. рис. 9.4). Анализ показывает, что длительность периода сработки водохранилища увеличивается с повышением глубины регулирования α , а с ней — и полезного объема водохранилища $V_{\text{полезн}}$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Цели и приемы расчетов первоначального наполнения водохранилища.
2. Как и с какой целью определяются водо- и энергоотдача за пределами расчетной обеспеченности?
3. Что входит в понятие «период сработки 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*. В качестве примера на рис. 13.1 приведена схема одного из самых крупных отечественных каскадов — Волжско-Камского, суммарная мощность девяти действующих ГЭС которого около 9000 МВт.

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.

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 перераспределен во вре-

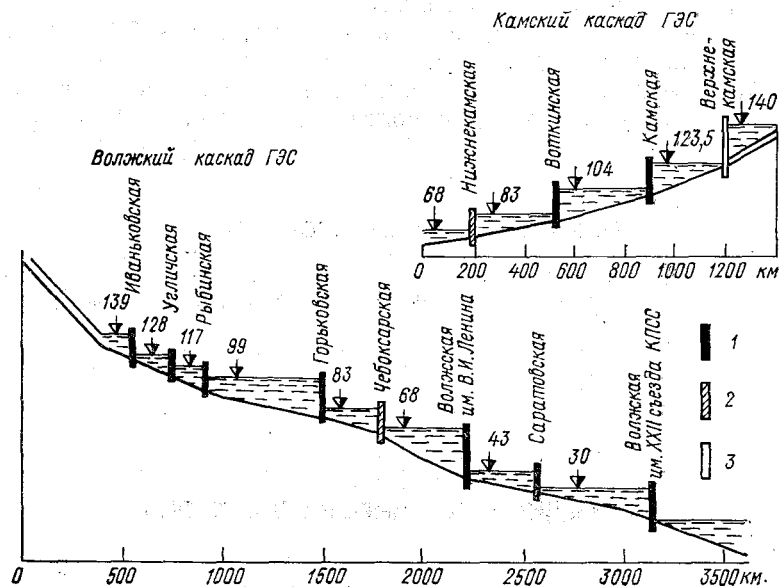


Рис. 13.1. Волжско-Камский каскад.

1 — действующая ГЭС, 2 — строящаяся ГЭС, 3 — проектируемая ГЭС.

мени, т. е. снижен 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.

13.2. Схемы каскадного регулирования стока

При работе каскадов водохранилищ оптимальный порядок наполнения и сработки каждого из них должен ставиться в зависимость не только от запасов воды, содержащихся во всех водо-

хранилищах, 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 разработаны 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 Красноярской, Иркутской и Братской ГЭС; Ангарского и Енисейского каскадов; действующих каскадов ГЭС Северо-Западного экономического района при их объединении.

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 | % |
| Красноярская Иркутская Братская | 4270 | 4 720 | 450 | 11 |
| Ангарский и Енисейский каскады | 9940 | 10 900 | 960 | 10 |
| Каскады ГЭС Северо-Западного экономического района | 1183 | 1 274 | 91 | 8 |

Увеличение гарантированной мощности позволяет увеличить участие ГЭС полной мощностью в покрытии суточного графика нагрузки и тем самым повысить надежность энергоснабжения.

**13.3. Компенсирующее регулирование стока в каскаде,
связанном гидравлически**

Простейшая схема компенсирующего регулирования стока может быть представлена каскадом из двух водохранилищ ГЭС. При этом верхнее (головное) водохранилище является крупным, проводящим глубокое многолетнее регулирование стока. Полезный объем нижнего водохранилища небольшой, способный осуществлять только недельное и суточное регулирование стока. Поэтому нижнее водохранилище ГЭС является компенсируемым, а верхнее — компенсатором водоотдачи каскада. Режим его водоотдачи определяется гидрографом боковой приточности на участке между створами ГЭС 1 и ГЭС 2. При повышенной водоотдаче ГЭС 2 на боковой приточности водоотдача ГЭС 1 уменьшается вплоть до санитарного минимума. Избытки притока в водохранилище-компенсаторе идут на его наполнение. В период пониженного бокового стока (межени) водоотдача из верхнего водохранилища увеличивается за счет сработки ранее накопленных избытков притока. Тем самым достигается регулирование (выравнивание) стока боковой приточности и стока в целом по каскаду, что приводит к увеличению его суммарной гарантированной водоотдачи. Расчетную схему компенсирующего регулирования легко понять из рис. 13.2, на котором приведены упрощенные схемы водоотдачи водохранилищ ГЭС 1 и 2 при независимом и компенсирующем регулировании.

Расчеты каскадного компенсирующего регулирования стока проводятся воднобалансовым методом по наблюдаемым или смоделированным стокowym рядам. Для удобства такие расчеты проводятся в форме таблиц, в которых реализуется следующее уравнение водного баланса:

$$Q_{акк\ ji} \Delta t_i = (Q_{пр\ ji} - Q_{зар\ ji}) \Delta t_i = [Q_{пр\ ji} - (Q_{исп\ ji} + Q_{п\ ji} + Q_{заб\ ji})] \Delta t_i, \quad (13.1)$$

где $Q_{акк\ ji}$ — расход аккумуляции, т. е. разность притекающего

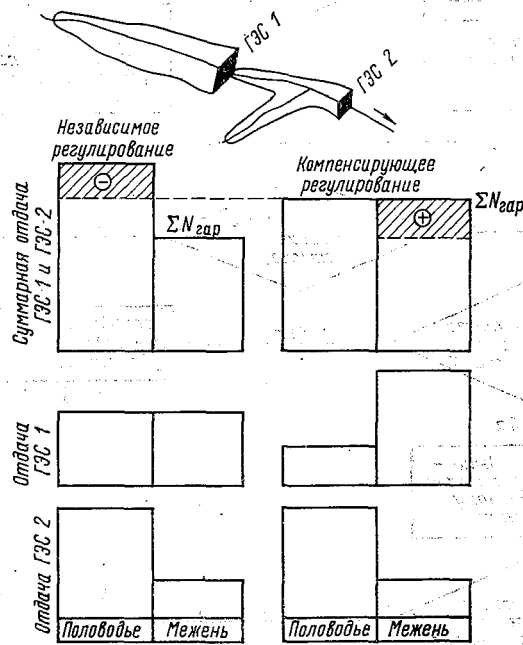


Рис. 13.2. Упрощенная схема отдачи каскада из двух ГЭС.

Водоохранилище ГЭС 1 — многолетнего регулирования стока, водоохранилище ГЭС 2 — сезонного.

($Q_{пр\ ji}$) и зарегулированного ($Q_{зар\ ji}$) расходов воды; $Q_{исп\ ji}$, $Q_{п\ ji}$, $Q_{заб\ ji}$ — расходы соответственно полезно используемый, потерь и забора стока из водоохранилища; Δt_i — расчетный временной интервал, т. е. его продолжительность; j — номер водоохранилища или створа.

Количество граф в таблице определяется числом водоохранилищ и расчетных створов.

Обобщенные методы применяются для приближенной оценки эффекта каскадного компенсирующего регулирования стока.

Из-за большой трудоемкости и значительного числа операций расчеты каскадного регулирования стока проводятся с использованием ЭВМ. Например, одной из возможных, но далеко не уни-

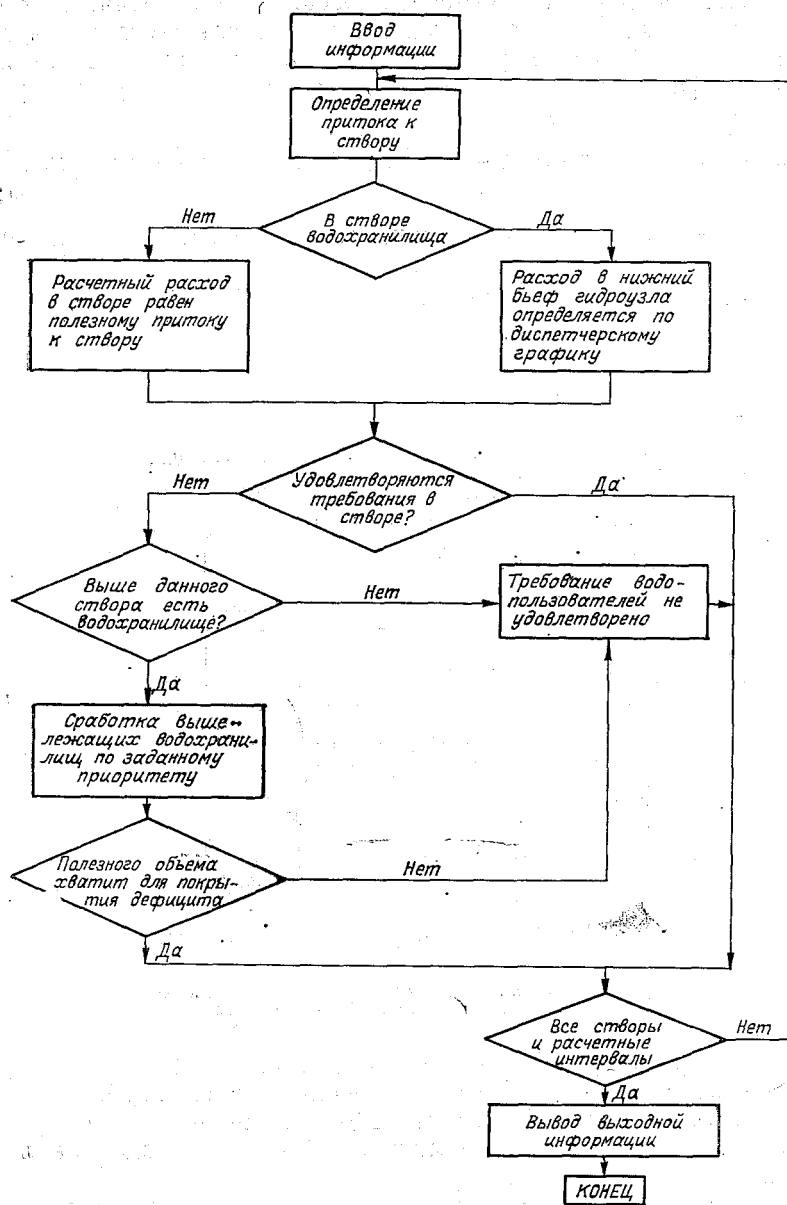


Рис. 13.3. Блок-схема программы «Бассейн».

версальных программ является программа «Бассейн», разработанная коллективом кафедры гидроэнергетики Московского энергетического института. Блок-схема этой программы дана на рис. 13.3. Программа позволяет определить режим водохозяйственной системы в проектных условиях для бассейна реки с несколькими расчетными створами, часть которых имеют водохранилища. Программа реализует уравнение водного баланса (13.1).

Речная система может быть принята произвольной и задается главной рекой и притоками любого порядка.

Гидрологическая информация задается в детерминированном виде календарными рядами приточности к верхним створам (водохранилищам) и боковых притоков на участках между расчетными створами (водохранилищами). Число расчетных интервалов и их продолжительность принимаются произвольными.

Требования к уровням воды в водохранилище ($Z_{в.б. j i}$) задаются в виде ограничений: $Z_{в.б. j i} \geq Z_{мин j i}$; $Z_{в.б. j i} \leq Z_{макс i}$. Требования к минимальным расходам в нижнем бьефе гидроузла или в расчетном створе задаются в виде ограничений: $Q_{н.б. j i} \geq Q_{j i}$. Требования к отдаче из водохранилищ в каждом расчетном интервале задаются или в виде водоотдачи $Q_{н.б. j i} = Q_{н.б.}(Z_{в.б. j i})$ или в виде энергоотдачи $N_{гэс} = N_{гэс}(Z_{в.б. j i})$ в зависимости от конкретных условий. Для каждого временного интервала задается несколько зон отдачи из водохранилища в зависимости от его уровня на начало расчетного интервала: *гарантированная, сниженная, повышенная*. Длительность цикла регулирования определяется видом регулирования (многолетнее, годовое и др.).

Программа «Бассейн» позволяет реализовать следующие режимы каскада гидроузлов: а) изолированная работа водохранилищ на заданные для каждого водохранилища требования; б) компенсирующее гидравлическое регулирование. При этом режим работы водохранилищ задается системой приоритетов, исходя из достижения наибольшей суммарной гарантированной отдачи каскада.

После проведения расчетов по всему ряду наблюдений или его расчетному периоду на печать выдаются ординаты кривых продолжительности уровней водохранилищ, расходов воды в нижних бьефах, средних уровней нижних бьефов, напоров и мощностей ГЭС.

Недостатком данной программы является то, что оптимизацию водо- или энергоотдачи каскада приходится выполнять последовательно вариантным заданием режимов работы водохранилищ, т. е. системой приоритетов. Это требует дополнительных затрат времени.

Если задача сводится к определению суммарной гарантированной энергоотдачи в каскаде, состоящем из ГЭС с водохранилищами различной степени регулирования стока и работающим в режиме компенсирующего регулирования, то ее можно решить несколько упрощенным методом, разработанным в Ленгидропроекте. При этом расчеты компенсирующего регулирования

проводятся не по расходам воды и объемам водохранилищ, а по их эквивалентам — энергии притока \mathcal{E}_Q и энергоемкости водохранилища \mathcal{E}_B в мегаваттах в месяц. Для этого предварительно таблица среднемесячных расходов воды притока в головное водохранилище и боковой приточности пересчитывается в таблицу энергий притока и боковой приточности, а таблица объемов водохранилищ — в таблицу энергоемкостей по формулам:

$$\mathcal{E}_Q = K_N Q \sum H,$$

$$\mathcal{E}_B = K_N V_{\text{полезн}} \sum H / (2,63 \cdot 10^6),$$

где K_N — коэффициент мощности, изменяющийся от 8,0 до 8,9; Q — среднемесячные расходы притока в водохранилище, или боковой приточности, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{\text{полезн}}$ — полезный объем водохранилища, м^3 ; $\sum H$ — суммарный напор в каскаде, м; $2,63 \cdot 10^6$ — среднее число секунд в месяце.

Расчет компенсирующего регулирования

| Месяц | Общая регулируемая мощность всех ГЭС, МВт-мес | Энергоемкость вдхр В, МВт-мес | Зарегулированная на частном притоке мощность ГЭС В, МВт-мес | Энергия частного притока к вдхр В, МВт-мес | Аккумуляция энергии частного притока в вдхр В (гр. 5 — гр. 4), МВт-мес | Энергоемкость вдхр Б, МВт-мес | Зарегулированная мощность ГЭС Б и В на частном притоке в вдхр Б, МВт-мес | Энергия частного притока в вдхр Б по напору ГЭС Б и В, МВт-мес | Аккумуляция энергии частного притока в вдхр Б (гр. 9 — гр. 8), МВт-мес |
|---------|---|-------------------------------|---|--|--|-------------------------------|--|--|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| V | 156 | 196,6 | 11,3 | 36,2 | 24,9 | 62,6 | 60,6 | 121,0 | 60,4 |
| VI | 171 | 221,5 | 30,9 | 33,4 | 2,5 | 123,0 | 84,0 | 84,0 | 0,0 |
| VII | 156 | 224,0 | 13,9 | 13,8 | -0,1 | 123,0 | 55,7 | 55,7 | 0,0 |
| VIII | 156 | 223,9 | 14,3 | 14,4 | 0,1 | 123,0 | 36,4 | 36,4 | 0,0 |
| IX | 156 | 224,0 | 13,4 | 13,4 | 0,0 | 123,0 | 33,7 | 33,7 | 0,0 |
| X | 156 | 224,0 | 16,5 | 16,5 | 0,0 | 123,0 | 34,0 | 23,9 | -5,11 |
| XI | 162 | 224,0 | 13,9 | 11,3 | -2,6 | 117,9 | 34,5 | 37,5 | -7,0 |
| XII | 162 | 221,4 | 13,6 | 8,26 | -5,34 | 110,9 | 33,0 | 9,64 | -23,36 |
| I | 162 | 216,1 | 12,7 | 7,04 | -5,66 | 87,54 | 26,5 | 11,2 | -15,3 |
| II | 162 | 210,4 | 12,2 | 5,81 | -6,39 | 72,21 | 25,0 | 8,03 | -16,97 |
| III | 162 | 204 | 11,4 | 8,56 | -2,86 | 55,27 | 25,0 | 9,64 | -15,36 |
| IV | 162 | 201,1 | 12,6 | 5,51 | -7,09 | 39,91 | 25,0 | 10,1 | -14,9 |
| Сумма | 1923 | | | | | | | | |
| Среднее | 160,2 | | | | | | | | |

Примечание. Энергоемкость водохранилищ дана на конец месяца. ностью зарегулировать энергию частного притока в вдхр Б; $\sum H$ — общий на-

Расчеты проводятся по форме табл. 13.2, в которой дан пример расчета компенсирующего регулирования стока в каскаде из трех ГЭС (сверху вниз по течению) *A*, *B* и *B*. По своему полезному объему водохранилище *A* является компенсатором отдачи по каскаду. Гидроэлектростанции *B* и *B* являются компенсируемыми установками. В целях получения наибольшей выработки энергии по каскаду на них желательно поддерживать высокие уровни, а сработку их водохранилищ предусматривать только в целях регулирования боковой приточности в маловодном году.

Порядок расчета компенсирующего каскадного регулирования:

1. Предварительно по методике, изложенной в п. 11.4, определяются параметры водохранилищ *B* и *B* на боковой приточности между ними.

2. С использованием обобщенных методов (п. 13.5) определяется суммарная обеспеченная среднегодовая мощность каскада

Таблица 13.2

мощности каскада из трех ГЭС за 1925-26 г.

| Энергоемкость вдхр <i>A</i> , МВт.мес | Зарегулированная мощность трех ГЭС на стоке из вдхр <i>A</i> (гр. 2 — гр. 4+гр. 8), МВт | Энергия притока в вдхр <i>A</i> по напору трех ГЭС, МВт.мес | Аккумуляция энергии в вдхр <i>A</i> (гр. 13 — гр. 12), МВт.мес | Мощность ГЭС <i>A</i> (гр. 12 × $N_A/\Sigma H$), МВт | Мощность ГЭС <i>B</i> на стоке из вдхр <i>A</i> (гр. 12. $N_B/\Sigma H$), МВт | Мощность ГЭС <i>B</i> на стоке из вдхр <i>A</i> [гр. 12 — (гр. 15+гр. 16)], МВт.мес | Мощность ГЭС <i>B</i> на частном притоке [гр. 8. $H : (\Sigma H - N_A)$], МВт | Мощность ГЭС <i>B</i> на частном притоке вдхр <i>B</i> (гр. 8 — гр. 18), МВт | Общая мощность ГЭС <i>B</i> (гр. 16 + гр. 18), МВт | Общая мощность ГЭС <i>B</i> (гр. 4 + гр. 17 + гр. 19), МВт |
|---------------------------------------|---|---|--|---|--|---|--|--|--|--|
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 647,1 | 84,1 | 224,0 | 139,9 | 27,2 | 27,7 | 29,2 | 29,4 | 31,2 | 57,1 | 71,7 |
| 727,3 | 56,0 | 195,0 | 139,0 | 18,1 | 18,4 | 19,5 | 40,7 | 43,3 | 59,1 | 93,7 |
| 926,3 | 86,4 | 81,0 | -5,4 | 27,9 | 28,4 | 30,1 | 27,0 | 28,7 | 55,4 | 72,7 |
| 920,9 | 105,3 | 79,1 | -26,2 | 34,0 | 34,7 | 36,6 | 17,7 | 18,7 | 52,4 | 69,6 |
| 894,7 | 108,9 | 68,5 | -40,4 | 35,2 | 35,8 | 37,9 | 16,3 | 17,4 | 52,1 | 68,7 |
| 854,3 | 105,5 | 62,5 | -43,0 | 34,1 | 34,7 | 36,7 | 16,5 | 17,5 | 51,2 | 70,7 |
| 811,3 | 113,6 | 59,0 | -54,6 | 36,7 | 37,4 | 39,5 | 16,7 | 17,8 | 54,1 | 71,2 |
| 756,7 | 115,4 | 57,1 | -59,8 | 37,3 | 38,1 | 40,0 | 16,0 | 17,0 | 54,1 | 70,6 |
| 697,4 | 122,8 | 44,9 | -77,9 | 39,6 | 40,4 | 42,8 | 12,8 | 13,6 | 53,3 | 69,1 |
| 619,5 | 124,8 | 57,8 | -67,0 | 40,3 | 41,0 | 43,5 | 12,1 | 12,9 | 53,1 | 68,6 |
| 552,5 | 125,6 | 33,4 | -92,2 | 40,5 | 41,4 | 43,7 | 12,1 | 12,9 | 53,5 | 68,0 |
| 460,3 | 124,4 | 31,7 | -92,7 | 40,3 | 41,0 | 43,1 | 12,1 | 12,9 | 53,5 | 68,6 |
| | | | | 411,2 | | | | | 648,9 | 862,9 |
| | | | | 34,3 | | | | | 54,07 | 71,91 |

В июне мощность превышает обеспеченную 156 МВт в связи с невозможностью сработки трех ГЭС: N_A , N_B и N_B ; вдхр — водохранилище.

при компенсирующем регулировании. В данном случае по методу «подкасательных» она определилась равной 159 МВт. Общая среднегодовая мощность делится на летнюю (май — октябрь) и зимнюю (ноябрь — апрель) составляющие, в данном случае 156 и 162 МВт соответственно, и записывается в графу 2.

3. Сначала водохранилищем *В* регулируется мощность ГЭС по частному стоку в водосборе ниже средней ГЭС *Б* (графа 4). Затем регулируется мощность ГЭС *Б* и *В* водохранилищем *Б* по частному стоку между створами ГЭС *Б* и *В* (графы 8, 18, 19). Затем вычисляем зарегулированную мощность всех ГЭС (графа 12) на стоке из водохранилища ГЭС *А*. Эту мощность пропорционально напорам распределяем по всем ГЭС (графы 15, 16, 17). В дальнейшем находим полные мощности ГЭС *Б* и *В* (графы 20 и 21) и подсчитываем наполнение — сработку водохранилища *А* (графы 11 и 14). При этом с учетом энергоемкости водохранилища *А* уточняется общая зарегулированная мощность каскада. При подсчете мощностей ГЭС *А*, *Б* и *В* необходимо вводить ограничения по их установленной мощности.

Организация и проведение компенсирующего регулирования стока экономически оправданы и на судоходных реках, в бассейне которых расположены одно или несколько водохранилищ. Рассмотрим это на примере одной из сибирских рек, в среднем течении которой расположено водохранилище ГЭС глубокого многолетнего регулирования. Водные ресурсы его используются для целей энергетики и водного транспорта. Требования водного транспорта сводятся к поддержанию расчетных уровней воды в контрольных створах на протяжении нижнего бьефа, при которых обеспечиваются габариты судового хода. Между расчетными створами имеется боковая приточность, дополнить или зарегулировать которую возможно попусками из водохранилища. При этом попуски из водохранилищ определяются разностью требуемого расхода воды в контрольных створах и расхода боковой приточности. Эффект компенсирующего регулирования полностью определяется надежностью прогнозирования боковой приточности ко времени добегания попуска ГЭС. Чем точнее прогноз, тем больший эффект достигается при компенсирующем регулировании.

В условиях слабоизученной и рассредоточенной боковой приточности, что имеет место на большинстве водотоков, а также недостаточной репрезентативности метеоданных использование классических методов прогноза бокового притока может дать значительные погрешности. В этих условиях возможно использование простой и удобной в эксплуатации методики определения судоходных попусков по схеме компенсирующего регулирования, разработанной в Ленгидропроекте и внедренной в бассейне р. Вилюя. Методика построена на прогнозировании боковой приточности по кривым истощения. Кривые истощения строятся по совмещенным ветвям спада гидрографов весенних половодий боковой приточности. Для этого рассчитываются ежедневные расходы боковой приточности путем вычитания из расходов воды

где $Q_{t+\tau}$ — снятый с кривой истощения расход воды боковой приточности; $Q_{тр}$ — расход воды в контрольном створе, требуемый для обеспечения гарантированной глубины;

5) так как фактическая интенсивность спада боковой приточности, как правило, меньше интенсивности спада по кривой истощения, размер попуска ежедневно корректируется путем ввода поправки на разность между фактической суточной интенсивностью спада и снятой с кривой истощения, т. е. окончательный размер попуска принимается равным

$$Q_{\text{поп}} = Q_{\text{тр}} - Q_{t+\tau} - (Q_t - Q'_t),$$

где Q_t — боковая приточность в день попуска; Q'_t — боковая приточность в день попуска, снятая с кривой истощения по Q_{t-1} , т. е. по расходу боковой приточности на предыдущие сутки. Например, расход боковой приточности в день попуска $10/VI$ равен $1400 \text{ м}^3/\text{с}$. По кривой истощения по этому расходу снимаем ожидаемый через время добегания τ расход боковой приточности — $760 \text{ м}^3/\text{с}$. По найденному расходу $760 \text{ м}^3/\text{с}$ предварительно назначаем навигационный попуск при $Q_{\text{тр}} = 1030 \text{ м}^3/\text{с}$ $Q_{\text{поп}} = 1030 - 760 = 270 \text{ м}^3/\text{с}$. По фактической боковой приточности в предыдущий день $9/VI$, равной $1500 \text{ м}^3/\text{с}$, снимаем с кривой истощения прогнозируемый расход на $10/VI$, равный $1260 \text{ м}^3/\text{с}$, и на разность между фактической боковой приточностью на $10/VI$ равной $1400 \text{ м}^3/\text{с}$, и прогнозируемой — $1260 \text{ м}^3/\text{с}$ уменьшаем навигационный попуск с 270 до $130 \text{ м}^3/\text{с}$.

Эффект предлагаемой методики выражается в увеличении гарантированной энергоотдачи ГЭС за счет уменьшения судоводных попусков.

13.4. Компенсирующее регулирование между каскадами, не связанными гидравлически

Как указывалось в п. 13.2, при создании энергетических систем имеет место объединение линиями электропередачи каскадов ГЭС, расположенных на реках с асинхронным режимом стока и водохранилищами различной степени регулирования стока. В этих условиях наиболее эффективным и экономически оправданным является организация и проведение межбассейнового компенсирующего электрического регулирования, эффект которого выражается в приращении суммарной гарантированной энергоотдачи объединяемых каскадов ГЭС.

Первая часть эффекта — за счет асинхронности стока рек — реализуется автоматически, как только каскады ГЭС будут объединены линией электропередачи. Вторая часть эффекта — за счет компенсации энергоотдачи на боковой приточности и менее зарегулированных ГЭС отдачей ГЭС с водохранилищами глубокого регулирования стока — реализуется только при организации и

проведении межбассейнового компенсирующего электрического регулирования.

Суммарная гарантированная энергоотдача объединенных каскадов ГЭС может быть определена путем регулирования по расчетному стоковому ряду. Первоначально по степени регулирования, показателем которой может служить коэффициент регулирования α , каскады ГЭС при независимом режиме их работы располагают в порядке его возрастания. Затем все каскады ГЭС разделяют по степени регулирования стока на две группы:

1) компенсируемые каскады ГЭС с водохранилищами, обладающими наименьшими возможностями регулирования стока (неглубокого многолетнего и сезонного регулирования);

2) компенсаторы отдачи остальных каскадов гидроэлектростанций энергосистемы. Они дополняют отдачу компенсируемых ГЭС до суммарного оптимального значения. Компенсаторами отдачи системы могут быть ГЭС с водохранилищами большого объема, проводящими глубокое многолетнее регулирование стока.

Математически задача в целом формулируется так: требуется определить оптимальное использование энергоемкости ГЭС-компенсаторов, при котором достигается максимум целевой функции:

$$\sum_{i=1}^m \mathcal{E}_{ГЭС i} = C_0 \rightarrow \text{макс.} \quad (13.2)$$

Первоначально расчеты регулирования стока проводятся по критическому маловодному периоду методом последовательного приближения (подбора) на заданную постоянную суммарную гарантированную отдачу энергообъединения, исходя из полной сработки энергоемкости водохранилища ГЭС-компенсатора. Чтобы не делать много операций в первом варианте, суммарная гарантированная отдача определяется обобщенным методом (см. п. 13.5).

При максимизации целевой функции должны соблюдаться следующие режимные ограничения:

по уровням наполнения и сработки водохранилища ГЭС-компенсатора

$$\mathcal{E}_{в УМО} \leq \mathcal{E}_{в i, j+1} \leq \mathcal{E}_{в НПУ},$$

где $\mathcal{E}_{в i, j+1}$ — энергоемкость водохранилища на конец интервала; $\mathcal{E}_{в НПУ}$ и $\mathcal{E}_{в УМО}$ — энергоемкость водохранилища соответственно при отметках НПУ и УМО;

по установленной мощности ГЭС-компенсаторов:

$$N_{kj} \leq N_{уст},$$

где N_{kj} и $N_{уст}$ — мощности каскада ГЭС-компенсатора соответственно в интервале j и установленная.

После выбора суммарной гарантированной отдачи расчеты проводятся за остальные годы наблюдаемого или смоделированного стокового ряда.

Блок-схема одной из управляющих программ расчета оптимального режима работы ГЭС в составе энергообъединения дана на рис. 13.5. Расчетный интервал времени Δt принимается равным 1 месяцу, что соответствует длительности интервалов, по которым ведется диспетчерское планирование режимов энергосистем.

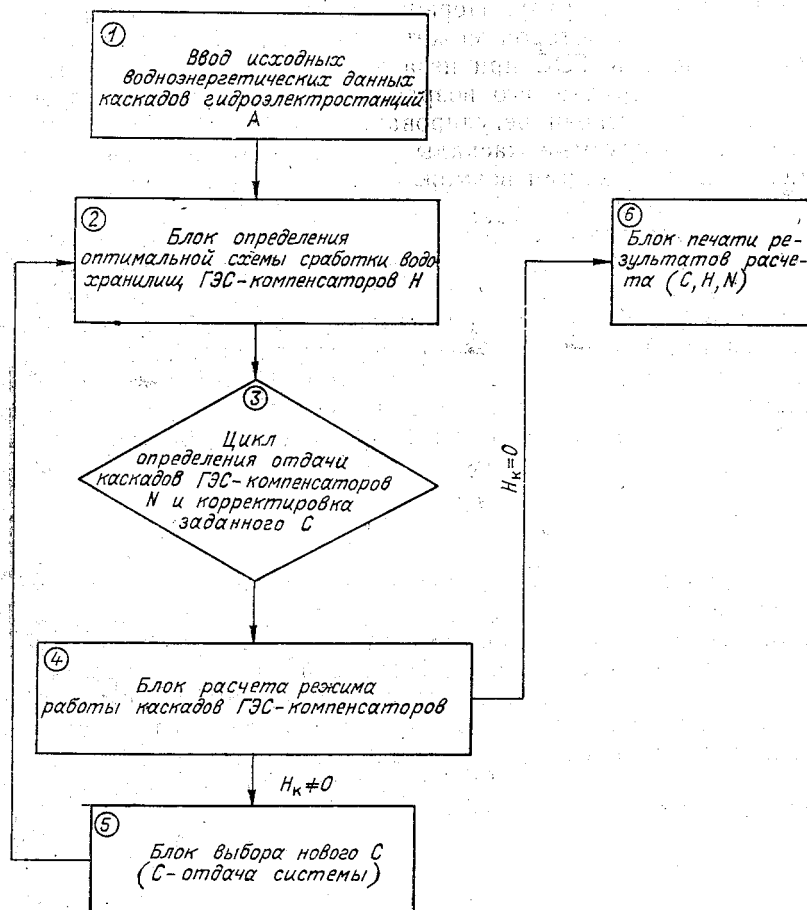


Рис. 13.5. Блок-схема управляющей программы расчета оптимального режима работы гидроэлектростанций.

Исходные данные. Блок № 1: сумма (A_j) среднемесячных мощностей (N_j) компенсируемых гидроэлектростанций (в условиях их изолированной работы), энергий притока в водохранилище ГЭС-компенсатора (P_{kj}) и боковых притоков к нижерасположенным ГЭС в каскаде B_{kj} , т. е. $A_j = N_j + P_{kj} + B_{kj}$ — за расчетный период.

Расчет начинается с межи первого года маловодного периода, на начало которой водохранилище принимается наполненным $H_{к.н} = \mathcal{E}_{в.н.пу}$.

Блок № 2: наполнение водохранилища на конец интервала времени $\Delta t - H_{к.к}$ при предварительно заданной суммарной отдаче системы C определяется по уравнению баланса

$$H_{к.к} = H_{к.н} \pm (A - C).$$

При $H_{к.н} = \mathcal{E}_{в.НПУ}$ и $A > C$, отдача $C = A$. В случае если $H_{к.н} < \mathcal{E}_{в.НПУ}$, но $A > C$ настолько, что их разность превышает свободный объем в водохранилище $(\mathcal{E}_{в.НПУ} - H_{к.н})$, $C = A + (H_{к.н} - H_{к.к})$.

Блок № 3: здесь происходит контроль за энергоотдачей каскада компенсатора. При этом энергоотдача его не должна превышать установленную $N_{уст}$. Если при заданном C в конце маловодного периода $H_{к.к} \neq 0$, то в заданную суммарную отдачу системы C вносится поправка

$$\pm \Delta C = H_{к.к}/T,$$

где T — период сработки полезного объема водохранилища-компенсатора. Знак плюс соответствует неполной сработке водохранилища, а минус — сработке водохранилища ниже УМО.

Расчет заканчивается, когда при заданном C $H_{к.к} = 0$. После этого происходит выдача на печать отдачи системы, наполнений водохранилища-компенсатора и отдачи каскада ГЭС-компенсатора.

В практике Ленгидропроекта широкое применение находит метод расчета суммарной энергоотдачи ГЭС в условиях их совместной работы в составе энергосистемы графическим способом по интегральным кривым эквивалентов стока и отдачи. Интегральные кривые строятся по месячным интервалам времени за длительный период наблюдений путем суммирования энергоотдачи в мегаваттах в месяц, компенсируемых ГЭС (среднемесячных мощностей N), рассчитанной путем регулирования стока поряду в условиях их изолированной работы, и энергии притока в водохранилище ГЭС-компенсатора (табл. 13.3). Здесь в каче-

Таблица 13.3

Подсчет значений ординат разностной интегральной кривой

| Год, месяц Δt | ГЭС-компенсатор | | | | | Компенсируемые ГЭС \mathcal{E}/N МВт·мес | Энергосистема | | | | | |
|-----------------------|----------------------------|--------|------------------|---------------------|--|---|------------------|---|--|------------------------------------|--------------------|--|
| | расходы, м ³ /с | | | средний напор, м | энергия притока \mathcal{E}_a МВт·мес | | Энергия, МВт·мес | | | | | |
| | притока брутто | потерь | притока нетто | | | | $N_c + D = I_e$ | суммарная на конец Δt $\mathcal{E}_\Sigma = \Sigma \mathcal{E}_i$ | суммарная средняя на конец Δt $\mathcal{E}_{ср}$ | $\mathcal{E} - \Sigma \mathcal{E}$ | $\mathcal{E}_{ср}$ | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

стве равномерной энергии \mathcal{E}_0 принимается среднее значение энергии $\mathcal{E}_{ср} = \Sigma \mathcal{E}_i/n$, где $\Sigma \mathcal{E}_i$ — суммарная энергия (отдачи компенсируемых ГЭС и притока в водохранилище ГЭС-компенсатора) за весь расчетный период, n — число интервалов.

Лучевой масштаб рассчитывается и строится аналогично изложенному в п. 8.1.

Расчет суммарной гарантированной энергоотдачи объединяемых ГЭС (каскадов ГЭС) в условиях компенсирующего регулирования производится следующим образом: из длительного ряда

(отдачи и притока) выбирают маловодные периоды; отложив в масштабе шкалы \mathcal{E} вниз от точки начала первого маловодного периода значение энергоемкости водохранилища ГЭС-компенсатора $\mathcal{E}_в$, проводят через ее конец касательную к точке конца первого маловодного периода. Наклоном этой касательной по лучевому масштабу и определится суммарная энергоотдача ГЭС в условиях организации и проведения межбассейнового компенсирующего регулирования стока. Техника расчета суммарной энерго-

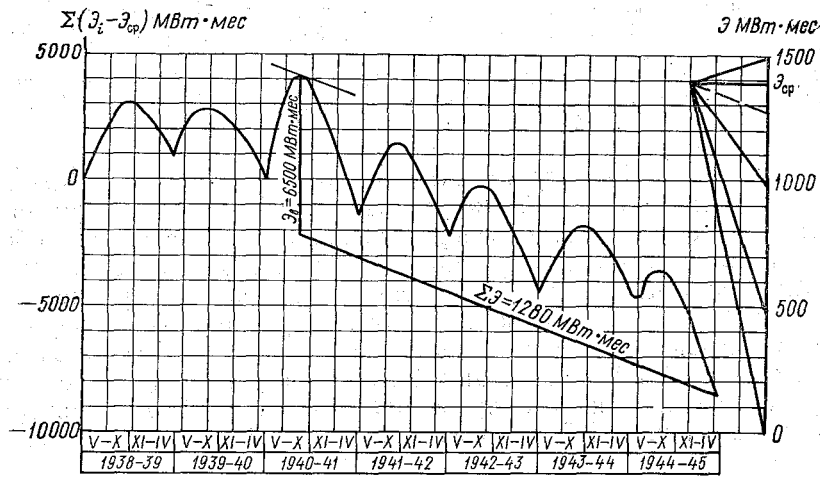


Рис. 13.6. Расчет суммарной энергоотдачи ГЭС в условиях их совместной работы по интегральной кривой эквивалентов стока и энергии водоотдачи.

отдачи ГЭС по известной энергоемкости водохранилища можно видеть на рис. 13.6.

Аналогичные расчеты проводят по нескольким маловодным периодам и в качестве расчетной суммарной гарантированной энергоотдачи принимают минимальную.

13.5. Основные положения методики обобщенных расчетов компенсирующего регулирования стока в составе каскадов и энергетических объединений

Обобщенные методы расчета многолетнего регулирования стока, основанные на теории вероятностей, для использования их на практике доведены до связей между гарантированной отдачей заданной обеспеченности α , многолетней составляющей полезного объема водохранилища $\beta_{мн}$, коэффициентами изменчивости годового стока (притока) $C_{ст}$ и автокорреляции r_1 :

$$\beta_{мн} = f(\alpha, C_{ст}, r_1).$$

Методика обобщенных расчетов водохозяйственных и водно-энергетических показателей каскадов гидроузлов с регулирующими водохранилищами разработана более схематично, чем для отдельных гидроузлов и водохранилищ. Поэтому возможности надежного определения гарантированной отдачи каскадов водохранилищ гидроузлов обобщенными способами без выполнения расчетов по многолетнему ряду существенно уменьшаются.

Рассмотрим аналитические и графические методы, применяемые в практике водохозяйственного проектирования каскадов водохранилищ и ГЭС.

Аналитические методы. Описанный в п. 11.4 обобщенный прием расчета параметров изолированных водохранилищ, по-видимому, может быть применен и к случаю каскада водохранилищ различной степени регулирования стока. При этом допускается, что сток всех входящих в него водохранилищ синхронен. Такое допущение обычно является практически приемлемым. Рассмотрим обобщенный прием расчета применительно к каскаду, состоящему из двух ступеней: верхней (индекс «в») и нижней (индекс «н»).

В зависимости от соотношения коэффициентов регулирования стока α верхним и нижним водохранилищами либо их относительных объемов β задача решается по-разному. При этом коэффициент регулирования стока водохранилищем верхней ГЭС α_v сопоставляется с коэффициентом регулирования естественного стока боковой приточности между верхней и нижней ГЭС α_n .

Если $\alpha_v < \alpha_n$, то водноэнергетические характеристики лежащей ниже по течению ГЭС определяют применительно к сумме полезных объемов верхнего и нижнего водохранилищ и к полному стоку в створе нижнего гидроузла: $\beta = (V_{\text{полезн. в}} + V_{\text{полезн. н}}) / W_{\text{г. н}}$. Здесь $V_{\text{полезн. в}}$ и $V_{\text{полезн. н}}$ — полезные объемы верхнего и нижнего водохранилищ; $W_{\text{г. н}}$ — средний многолетний сток реки в нижнем створе. По кривой $\alpha = f(\beta)$ или $\alpha = f(V_{\text{полезн.}}$ устанавливают коэффициент регулирования стока α , гарантированный расход $Q_{\text{гар}}$ и соответствующую ему гарантированную мощность $N_{\text{гар}}$; затем, задаваясь δ , по номограммам определяют η , получают средний многолетний используемый ГЭС расход воды брутто $Q_{\text{исп. бр}} = \eta Q_{\text{г}}$ и уменьшают его на размер потерь. После этого по используемому ГЭС расходу воды нетто $Q_{\text{исп. нетто}}$ и соответствующему $N_{\text{нетто}}$ вычисляют $\bar{E}_{\text{г}}$.

Если $\alpha_v > \alpha_n$, т. е. верхнее водохранилище ведет более глубокое регулирование стока, чем нижнее, то энергоотдачу нижней ГЭС рассчитывают применительно к сумме зарегулированного расхода воды в нижнем бьефе верхней ГЭС $Q_{\text{гар. в}}$ и зарегулированной нижним водохранилищем боковой приточности между створами верхнего и нижнего гидроузлов $Q_{\text{гар. б. п.}}$. При определении $N_{\text{гар}}$ нижней ступени каскада условно принимают, что нижнее водохранилище осуществляет регулирование боковой приточности лишь между створами верхнего и нижнего гидроузлов, а за-

регулируемые расходы, поступающие в нижний бьеф верхнего гидроузла, проходят транзитом через нижний гидроузел.

Для определения степени энергетического использования стока нижней ГЭС ее максимальная пропускная способность q условно разделяется на две составляющие: q_v — турбинный расход, поступающий от верхнего гидроузла, и $q_{б.п.}$ — турбинный расход, поступающий с частного водосбора между верхней и нижней ступеню. Значения q_v и $q_{б.п.}$ вычисляются по следующим формулам:

$$q_v = \frac{q(1 - \alpha_v) + \bar{Q}_{б.п.}(\alpha_v - \alpha_{б.п.})}{\bar{Q}_{б.п.}(1 - \alpha_{б.п.}) + \bar{Q}_v(1 - \alpha_v)}, \quad (13.3)$$

$$q_{б.п.} = \frac{q(1 - \alpha_{б.п.}) + \bar{Q}_v(\alpha_{б.п.} - \alpha_v)}{\bar{Q}_{б.п.}(1 - \alpha_{б.п.}) + \bar{Q}_v(1 - \alpha_v)}. \quad (13.4)$$

Вычислив q_v и $q_{б.п.}$, получим коэффициенты $\delta_v = q_{v, \text{ макс}}/Q_{\text{гар. в}}$ и $\delta_{б.п.} = q_{б.п., \text{ макс}}/Q_{\text{гар. б.п.}}$, а затем по номограммам $\eta = f(\alpha, \delta)$ определим коэффициенты η_v и $\eta_{б.п.}$. Сумма произведений $\eta_v \bar{Q}_v$ и $\eta_{б.п.} \bar{Q}_{б.п.}$ является средним многолетним используемым расходом воды нижней ГЭС. По этому расходу и напору нижней ГЭС, определенному так же, как для отдельной ГЭС, вычисляют $\bar{\mathcal{E}}_r$ нижней ГЭС для серий значений $N_{\text{уст}}$.

Второй обобщенный аналитический метод позволяет оценить водноэнергетический эффект за счет организации и проведения компенсирующего регулирования как в каскаде гидравлически связанным, так и в каскадах гидравлически не связанных. 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 определяются по зависимостям $C_{vr} = \sigma/\bar{Q}_r$ или в условиях энергообъединений $C_{vr} = \sigma\bar{\mathcal{E}}_r$. Здесь σ — стандартное отклонение от нормы; $\bar{\mathcal{E}}_r$ — энергия среднегодового стока на соответствующем суммарном напоре каскада ГЭС или напоре одиночной ГЭС, определяемая по формуле $\bar{\mathcal{E}}_r = 8760 K_N \bar{Q}_r \Sigma H$ кВт·ч, где K_N — коэффициент мощности (8,1—8,9), \bar{Q}_r — норма годового стока (притока), ΣH — суммарный напор, 8760 — среднее число часов в году.

Из математической статистики известно, что дисперсия суммарного ряда

$$\begin{aligned} \sigma_n^2 &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2 + 2\sigma_1\sigma_2r_{1/2} + \\ &+ 2\sigma_1\sigma_3r_{1/3} + 2\sigma_2\sigma_3r_{2/3} + \dots + 2\sigma_{n-1}\sigma_n r_{n-1/n}. \end{aligned} \quad (13.5)$$

Здесь $\sigma_1 = C_{v_1} \bar{\mathcal{E}}_1$; $\sigma_n = C_{v_n} \bar{\mathcal{E}}_n$, где C_{v_1} , $C_{v_2} \dots C_{v_n}$ — коэффи-

циенты изменчивости годового притока в соответствующие водохранилища ГЭС; $\bar{\mathcal{E}}_1, \bar{\mathcal{E}}_2, \bar{\mathcal{E}}_3 \dots \bar{\mathcal{E}}_n$ — энергия годового притока в водохранилища на соответствующем суммарном напоре каскада ГЭС; $r_{1/2}, r_{1/3}, \dots, r_{n-1/n}$ — коэффициенты корреляции между годовыми притоками в соответствующие водохранилища.

Расчеты проводятся последовательно от водохранилищ с низкой степенью регулирования к водохранилищам с высокой степенью регулирования стока. При этом число связей определяется по известной формуле $S = n(n-1)/2$, где n — число водотоков. Например, при $S=45$ $n=10$. Это достаточно большой объем вычислений. Поэтому в целях уменьшения объема вычислений при определении дисперсий суммарного ряда может быть использована формула

$$\sigma_{\sum_1}^2 = \left[\left(\sum_1^{n-1} \bar{\mathcal{E}} \right) C_{v_{n-1}} \right]^2 + \sigma_n^2 + 2 \left(\sum_1^{n-1} \bar{\mathcal{E}} \right) C_{v_{n-1}} \sigma_n r_{n-1} / n. \quad (13.6)$$

Стандартное отклонение суммарного ряда $\sigma_{\sum_1} = \sqrt{\sigma_{\sum_1}^2}$. Здесь

$\sigma_n = C_{v_n} \bar{\mathcal{E}}_n$; $\bar{\mathcal{E}}_n$ — энергия годового стока, контролируемого ГЭС; $C_{v_{n-1}}$ — коэффициенты изменчивости сумм годовой энергии стока, контролируемой гидроэлектростанциями, от 1-й до $(n-1)$ -й; r_{n-1} / n — коэффициент корреляции между суммой энергии годового стока на ГЭС от 1-й до $(n-1)$ -й и энергией на n -й ГЭС.

По вычисленной дисперсии ряда определяем коэффициент изменчивости суммарной энергии годового стока:

$$C_{v_{\sum_1}} = \sigma_n / \sum_1^n \bar{\mathcal{E}}, \quad (13.7)$$

где σ_n — стандартное отклонение суммарной энергии стока;

$\sum_1^n \bar{\mathcal{E}}$ — суммарная энергия годового стока с различных частей бассейна.

По найденным $C_{v_{\sum_1}}$ и известному коэффициенту многолетней составляющей объема β_n с графиков Гуглия или Плешкова,

в зависимости от r_1 , снимаем коэффициент регулирования суммарной отдачи всех гидроэлектростанций α_n (при заданной обеспеченности отдачи).

Суммарная гарантированная отдача энергообъединения при компенсирующем регулировании и с учетом асинхронности стока будет равна

$$\mathcal{E}_{\text{гар}}^n = \alpha_n \sum_1^n \bar{\mathcal{E}}, \quad \text{а } N_{\text{гар}}^n = \mathcal{E}_{\text{гар}}^n / 8760.$$

Расчеты проводятся последовательно от ГЭС с водохранилищами неглубокого регулирования к ГЭС с водохранилищами, обладающими большими α , по форме табл. 13.4.

В условиях водохранилищ ГЭС, осуществляющих полное годичное регулирование стока, эффект от компенсирующего регулирования можно определить по таблицам Фостера—Рыбкина или по трехпараметрическим гамма-распределениям. При этом по $C_{\text{вр}}^n$ определяется модульный коэффициент стока K_p , расчетной

$$\text{обеспеченности } p \text{ и с учетом его } \mathcal{E}_{\text{гар}}^n = K_p \sum_1^n \bar{\mathcal{E}}.$$

Применение указанного метода позволяет установить влияние как асинхронности годового стока рек, так и компенсирующего регулирования на увеличение суммарной гарантированной отдачи. Метод позволяет рассчитать теоретический эффект, без учета воднотранспортных попусков в навигационный период и ограничения по пропускной способности линии электропередачи, что на предпроектных стадиях вполне допустимо. В дальнейшем получаемый эффект можно откорректировать с учетом реально складывающихся ограничений в системе.

Сопоставление результатов расчетов, проведенных обобщенным методом и путем регулирования по стоковым рядам (применительно к условиям объединенных энергосистем Северо-Запада и Сибири), дало практически одинаковые результаты. Это подтверждает достоверность результатов, полученных с использованием формулы дисперсии суммы случайных величин.

Если требуется определить суммарную гарантированную водоотдачу каскада водохранилищ $\left(W_{\text{гар}}^n \right)$, то в расчетную схему

необходимо вместо энергии годового стока подставить соответствующие значения среднего многолетнего стока (\bar{W}_i), контролируемого водохранилищами. При этом порядок расчета сохраняется.

Графический метод. Эффект компенсирующего регулирования стока в составе каскада водохранилищ и ГЭС или при их объединении в водохозяйственные и энергетические системы можно

Таблица 13.4

Расчет суммарной гарантированной энергоотдачи гидроэлектростанций

| ГЭС | Энергия среднегодового стока \bar{E}_T млрд кВт·ч | Коэффициент $\beta_{\text{мн}}$ | Параметры стока и отдачи | | | | | | | | Увеличение гарантированной мощности $\Delta N_{\text{гар}}$ МВт |
|-------|--|---------------------------------|-------------------------------|----------|---|-----------------|----------------------------------|-----------------|----------|--------------------------------|--|
| | | | при независимом регулировании | | | | при компенсирующем регулировании | | | | |
| | | | $C_{\text{ог}}$ | α | $\frac{N_{\text{гар}}}{C_{\text{ог}}} = \frac{E_{\text{гар}}}{8760}$ МВт | $C_{\text{ог}}$ | α | $C_{\text{ог}}$ | α | $E_{\text{гар}}$ млрд кВт·ч | |
| ГЭС 1 | 47,9 | 0,00 | 0,09 | 0,82 | 39,2 | 4 483 | 0,08 | 0,86 | 53,66 | 6 126 | 237 |
| ГЭС 2 | 14,5 | 0,24 | 0,15 | 0,85 | 12,3 | 1 406 | 0,08 | 0,90 | 103,68 | 11 836 | 523 |
| Итого | 62,4 | 0,04 | 0,14 | 0,90 | 47,52 | 5 889 | 0,08 | 0,90 | 107,55 | 12 277 | 583 |
| ГЭС 3 | 52,8 | 0,31 | 0,20 | 0,77 | 3,34 | 381 | 0,07 | 0,91 | 111,93 | 12 777 | 838 |
| Итого | 115,2 | 0,11 | 0,12 | 0,70 | 2,41 | 275 | 0,07 | 0,91 | 113,75 | 12 985 | 855 |
| ГЭС 4 | 4,34 | 0,08 | 0,20 | 0,77 | 3,34 | 381 | 0,07 | 0,91 | 111,93 | 12 777 | 838 |
| Итого | 119,5 | 0,11 | 0,12 | 0,70 | 2,41 | 275 | 0,07 | 0,91 | 113,75 | 12 985 | 855 |
| ГЭС 5 | 3,44 | 0,00 | 0,12 | 0,70 | 2,41 | 275 | 0,07 | 0,91 | 111,93 | 12 777 | 838 |
| Итого | 123,0 | 0,10 | 0,20 | 0,83 | 1,68 | 191 | 0,07 | 0,91 | 113,75 | 12 985 | 855 |
| ГЭС 6 | 2,02 | 0,32 | 0,20 | 0,83 | 1,68 | 191 | 0,07 | 0,91 | 113,75 | 12 985 | 855 |
| Всего | 125,0 | 0,10 | 0,20 | 0,83 | 1,68 | 191 | 0,07 | 0,91 | 113,75 | 12 985 | 855 |

рассчитать и графическим методом, вошедшим в практику под названием *метода подкасательных*.

Метод основан на использовании обобщенных водохозяйственных характеристик водохранилищ, представленных в виде зависимостей $V_{\text{полезн}} = f(\alpha)$.

Сущность метода подкасательных заключается в следующем.

При определении эффекта в приращении гарантированной энергоотдачи обобщенные водохозяйственные характеристики во-

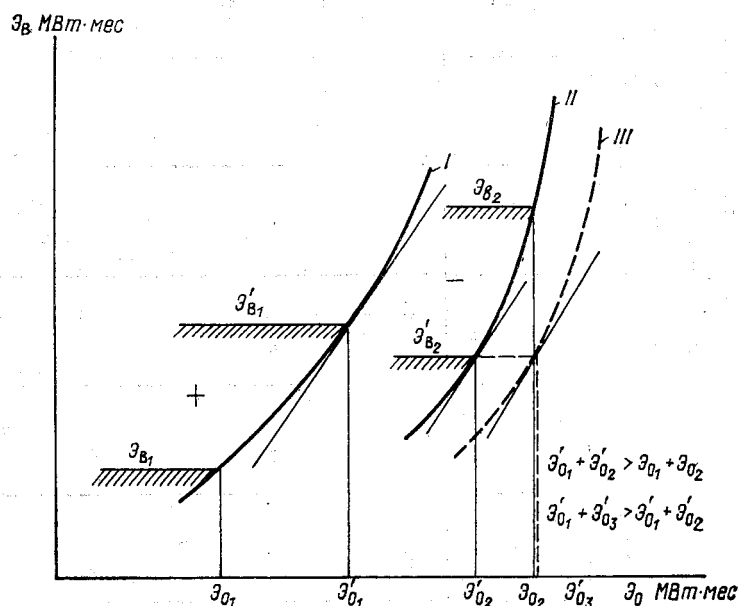


Рис. 13.7. Схема компенсирующего регулирования методом подкасательных с учетом и без учета асинхронного стока.

I — кривая $\mathcal{E}_{в1} = f(\mathcal{E}_{01})$ для водохранилища 1; *II* — кривая $\mathcal{E}_{в2} = f(\mathcal{E}_{02})$ для водохранилища 2 без учета асинхронности притока с притоком в водохранилище 1, а кривая *III* — с учетом асинхронности притоков в водохранилища 1 и 2.

дохранилищ $V_{\text{полезн}} = f(\alpha)$ предварительно перестраивают в зависимость вида $\mathcal{E}_{в} = f(\mathcal{E}_{0})$, где $\mathcal{E}_{в}$ — энергоемкость водохранилища МВт·мес; \mathcal{E}_{0} — гарантированная энергоотдача, МВт·мес. Последняя определяется по формуле $\mathcal{E}_{0} = \alpha \bar{\mathcal{E}}$, где $\bar{\mathcal{E}}$ — энергия среднегодового стока на соответствующем суммарном напоре каскада $\sum H$ за 12 месяцев года, т. е. $\bar{\mathcal{E}} = 12K_N \bar{Q} \sum H$.

Если к кривой $\mathcal{E}_{в} = f(\mathcal{E}_{0})$ провести касательную (рис. 13.7), то числовое значение тангенса угла наклона касательной к оси абсцисс соответствует периоду сработки полезного объема водохранилища T .

Увеличение суммарной гарантированной мощности энергосистемы при проведении компенсирующего регулирования достигается путем накапливания энергии (стока) в энергоемких водохранилищах ГЭС-компенсаторах в периоды повышенной отдачи на компенсируемых ГЭС сезонного регулирования и сработки накопленных избытков в периоды низкой отдачи на последних, т.е. за счет частичного использования повышенной сезонной отдачи в качестве гарантированной отдачи. Графически (см. рис. 13.7) расчет ведется следующим образом: подбираем такое значение периода сработки водохранилищ, при котором энергоемкость сработки водохранилища ГЭС-компенсатора (со знаком минус) была бы равна приращению энергоемкости водохранилища компенсируемой ГЭС (со знаком плюс). Емкость, расположенная над энергоемкостью, т.е. над НПУ водохранилищ неглубокого регулирования стока и есть скомпенсированная водохранилищами глубокого регулирования стока часть сезонной отдачи, которая используется для повышения суммарной гарантированной мощности.

Снимаем значения \mathcal{E}_0 , соответствующие точкам касания, и, суммируя их, получаем гарантированную отдачу в условиях компенсирующего регулирования.

Так как кривые $\mathcal{E}_B = f(\mathcal{E}_0)$ построены для каждого водохранилища или группы водохранилищ в зависимости от коэффициента изменчивости годового стока $C_{ог}$ отдельных гидрологических рядов, без учета асинхронности стока, то, следовательно, определяемая по ним суммарная гарантированная мощность учитывает только емкостной эффект компенсирующего регулирования стока. Поэтому данный метод широко применяется для определения эффекта каскадного компенсирующего регулирования стока, так как в пределах небольшого каскада ГЭС сток, как правило, синхронен. Однако с учетом зависимостей (13.5)—(13.7) метод подкасательных может быть использован и для определения эффекта полного компенсирующего регулирования стока, для чего необходимо рассчитать и построить кривую 3 на рис. 13.7 с учетом асинхронности ее с кривой 1.

Если задача сводится к определению приращения водоотдачи каскада из двух водохранилищ при организации компенсирующего регулирования стока методом подкасательных, то в этом случае порядок расчета будет следующий: на первом этапе построенные для условий изолированной работы кривые зависимости $V_{\text{полезн}} = f(\alpha)$ в створе верхнего водохранилища и на боковой приточности перестраиваются в зависимости вида $V_{\text{полезн}} = f(\alpha W_r)$. Такие зависимости приведены на рис. 13.8. Кривая этой зависимости в створе верхнего водохранилища (кривая 2) построена без учета асинхронности стока в створе 1 со стоком бокового притока. Для того чтобы построить ее с учетом асинхронности стока, необходимо рассчитать коэффициент изменчивости годового стока в створе верхнего водохранилища с учетом асинхронности его с боковым притоком, которая количественно оценивается коэффициентом корреляции $r_{1/2}$. По формуле (13.5) для ряда из двух членов рассчитываем σ_2 . Стандартное отклонение от

нормы в створе верхнего водохранилища с учетом асинхронности стока его с боковым притоком определяется по формуле $\sigma_{1a} = \sigma_2 - \sigma_2 = \frac{\sum}{1}$
 $= C_{v.б.пр} \bar{Q}_{б.пр}$ ($C_{v.б.пр}$ и $\bar{Q}_{б.пр}$ — коэффициенты изменчивости и норма стока боковой приточности). Зная σ_{1a} , нетрудно определить коэффициент изменчивости годового стока в створе верхнего регулирующего водохранилища с учетом асин-

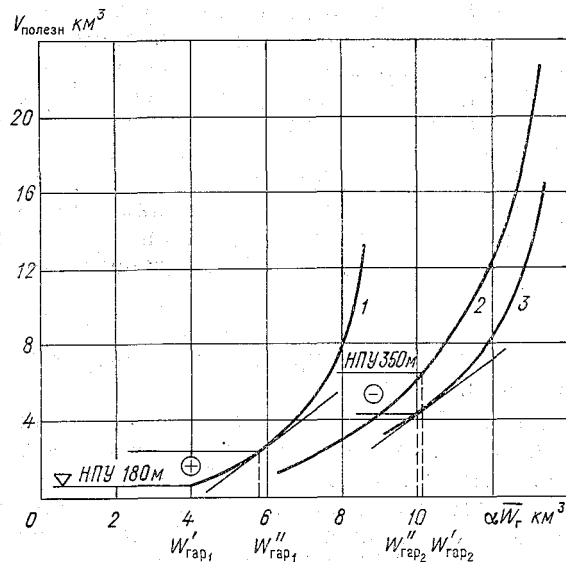


Рис. 13.8. Определение суммарной гарантированной водоотдачи каскада из двух водохранилищ ГЭС при компенсирующем регулировании стока методом подкасательных.

1 — кривая зависимости $V_{\text{полезн}} = f(\alpha \bar{W}_{б.пр})$ на боковой приточности; 2 — кривая зависимости $V_{\text{полезн}} = f(\alpha \bar{W}_г)$ водохранилища ГЭС 1 без учета асинхронности стока в створе ГЭС 1 со стоком боковой приточности; 3 — то же с учетом асинхронности стока.

хронности: $C_{v1a} = \sigma_{1a} / \bar{Q}_г$. С учетом нового C_{v1a} по номограммам определяем значения многолетней составляющей полезного объема для заданных α (в дальнейшем $\alpha \bar{W}_г$). Сезонный объем при этом остается неизменным. Суммируя многолетний и сезонный объемы, рассчитываем полезный объем водохранилища с учетом асинхронности стока. Таким простым способом рассчитана и построена кривая 3 на рис. 13.8.

Далее методом подкасательных, изложенным выше, определяем суммарную водоотдачу водохранилищ при компенсирующем регулировании и с учетом асинхронности стока. Из рис. 13.8 видно, что суммарная гарантированная водоотдача при компенсирующем регулировании $\Sigma W_{\text{гар}} = W''_{\text{гар1}} + W''_{\text{гар2}} = 5,8 + 10,0 = 15,8 \text{ км}^3$. В то же время при изолированной работе $\Sigma W_{\text{гар}} = W'_{\text{гар1}} +$

$+ W'_{\text{гар}_2} = 4,0 + 10,1 = 14,1 \text{ км}^3$. Таким образом, приращение суммарной гарантированной водоотдачи при проведении компенсирующего регулирования в данном случае составляет $1,7 \text{ км}^3$, или $10,2 \%$.

При разработке территориальных и бассейновых схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, схемы 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 разновременным наступлением на них периодов высокого и низкого стока или с непараллельным ходом стока одноименных сезонов.

Количественный эффект асинхронности рассчитывается по среднемесячным рядам стока.

В реках-донорах резервируется остаточный экологический сток в зависимости от типа реки по условиям охраны природы, водной и околоводной флоры и фауны. Остаточный экологический сток является динамической величиной, изменяющейся в зависимости от водности года в виде гидрографов среднемесячных расходов воды различной обеспеченности.

Свободный сток оценивается как разность естественного и остаточного экологического в годы различной обеспеченности. Время транспортировки стока от реки-донора к реке-приемнику учитывается условно.

Суммарный хронологический сток находят путем суммирования матриц среднемесячных значений свободного (над экологическим) 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

$$\sum Q_{\text{хр}}^{1-12} = (Q_{\text{ест}}^{\text{р.-д}} - Q_{\text{эк}}^{\text{р.-д}}) + Q_{\text{ест}}^{\text{р.-п}}, \quad (13.8)$$

где $\sum Q_{\text{хр}}^{1-12}$ — суммарный хронологический сток последовательно с 1-го по 12-й месяц; $Q_{\text{ест}}^{\text{р.-д}}$ и $Q_{\text{эк}}^{\text{р.-д}}$ — соответственно естественный и остаточный экологический сток реки-донора с 1-го по 12-й месяц; $Q_{\text{ест}}^{\text{р.-п}}$ — естественный среднемесячный сток реки-приемника с 1-го по 12-й месяц.

Расчет суммарного равнообеспеченного стока выполняется путем ранжирования среднемесячных значений свободного (над

экологическим) стока рек-доноров и отдельно стока рек-приемников в убывающем порядке с одновременным расчетом эмпирических значений обеспеченности. Затем равнообеспеченные значения среднемесячного стока (свободного и естественного) суммируются.

$$\sum Q_{рб}^{1-12} = (Q_{ест}^{р.д} - Q_{эк}^{р.д})_р \% + (Q_{ест}^{р.п})_р \%, \quad (13.9)$$

где $\sum Q_{рб}^{1-12}$ — суммарный равнообеспеченный сток с 1-го по 12-й месяц; $(Q_{ест}^{р.д} - Q_{эк}^{р.д})_р \%$ — расчетные значения свободного стока реки-донора той же обеспеченности, что и реки-приемника; $(Q_{ест}^{р.п})_р \%$ — расчетные значения естественного стока реки-приемника той же обеспеченности, что и реки-донора. По одинаковым значениям обеспеченности и за одноименные месяцы определяют коэффициент асинхронности и абсолютное значение количественного эффекта:

$$K_a = \sum Q_{хр}^{1-12} / \sum Q_{рб}^{1-12}; \Delta Q = \sum Q_{хр}^{1-12} - \sum Q_{рб}^{1-12}, \quad (13.10)$$

где K_a — коэффициент асинхронности, характеризующий относительное значение эффекта; ΔQ — количественный эффект асинхронности, выражаемый как в расходах воды (m^3/c), так и в объемных единицах (млн m^3 или $км^3$).

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.

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. Чем отличаются условия работы каскадно расположенных водохранилищ от изолированных?
2. Назовите схемы работы водохранилищ в каскаде.
3. В какой последовательности и как ведется компенсирующее каскадное регулирование стока?
4. Каковы гидрологические и водохозяйственные предпосылки для проведения электрического компенсирующего регулирования стока?
5. В чем заключаются основные положения методики обобщенных расчетов каскадного регулирования стока?

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

14.1. Краткий обзор современного состояния методики управления водными ресурсами водохранилищ

Основной задачей теории и практики регулирования и использования речного стока является разработка правил управления водными ресурсами водохранилищ гидроузлов.

Отечественной науке в области методики разработки правил эксплуатации водохранилищ длительного многолетнего регулирования стока принадлежит ведущее место.

Порядок эксплуатации водохранилищ в России и бывших союзных республиках определяется в соответствии с «Основами водного законодательства» и «Основными правилами использования водных ресурсов», утвержденными соответствующими органами. Выполнение этих правил обязательно как при проектировании режима, так и при работе действующей установки. Они составлены так, чтобы при эксплуатации водохранилища достигался эффект, близкий к оптимальному.

«Правила управления работой водохранилищ» 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 диспетчерских правил регулирования стока.

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:

- а) обеспечить гарантированную водо- или энергоотдачу;
- б) своевременно выявить избытки воды для использования их на повышенной отдаче;
- в) смягчить перебои отдачи в условиях дефицита воды, уменьшая глубину перебоев за счет увеличения их продолжительности. Эти условия возникают тогда, когда естественный расход воды в реке и существующие в данный момент запасы воды в водохранилище не могут обеспечить нормальный режим водопользования. Следует заметить, что ограничение водопользования в период дефицита водных ресурсов приводит к определенным ущербам в народном хозяйстве;

г) снижать холостые сбросы, т. е. непроизводительные потери воды;

д) устранять переполнение водохранилища над НПУ и ФПУ. Таким образом, составление правил управления, специфических для каждого водохранилища, позволяет повысить эффективность использования стока за счет непроизводительных сбросов, появляющихся в любое время и в широких пределах, и возможного снижения глубины перебоев в отдаче в остродефицитные по воде периоды.

Специальные правила управления работой водохранилищ практически оформляются в виде диспетчерских графиков, представляющих собой временные связи между энергоотдачей, заборами воды в верхнем бьефе, пусками воды в нижний бьеф, с одной стороны, и уровнями воды в водохранилище, с другой.

Значительный вклад в разработку диспетчерских графиков внесли С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель, Д. В. Коренистов, В. А. Бахтиаров, Л. Ф. Плешков и др. Накоплен ценный опыт в разработке диспетчерских графиков и в проектных и научно-исследовательских институтах — Гидропроекте, Энергосетьпроекте, Гипроводхозе:

При построении диспетчерского графика на оси ординат откладываются наполнение или уровни водохранилища, на оси абсцисс — время года. Он представляет собой линии, разграничивающие зоны, в пределах каждой из которых отдается потребителю определенный расход воды или мощность, исходя из бесперебойной его работы. Виды диспетчерских графиков при сезонном и многолетнем регулировании стока приведены на рис. 14.1.

Как правило, поле диспетчерского графика разделяется характерными линиями на четыре основные зоны работы водохранилища:

- 1) гарантированной отдачи ($Q=Q_{\text{гар}}$ или $N=N_{\text{гар}}$);
- 2) повышенной отдачи или незакрепленного режима ($Q_{\text{в}} \geq Q \geq Q_{\text{гар}}$ или $N_{\text{уст}} \geq N \geq N_{\text{гар}}$);
- 3) полной производительности установки ($Q = Q_{\text{в}}$ или $N = N_{\text{уст}}$);
- 4) урезанной отдачи или ограничений ($Q < Q_{\text{гар}}$ или $N < N_{\text{гар}}$).

Здесь Q и N — водо- и энергоотдача из водохранилища, $\text{м}^3/\text{с}$ и тыс. кВт (МВт); $Q_{\text{гар}}$ и $N_{\text{гар}}$ — гарантированная водо- и энергоотдача расчетной обеспеченности; $N_{\text{уст}}$ — установленная мощность ГЭС; $Q_{\text{в}}$ — полная пропускная способность ГЭС или водо потребляющих установок.

К характерным линиям диспетчерского графика относятся следующие:

1. Противоперебойная линия, представляющая собой верхнюю границу зоны гарантированной отдачи. Отделяет зону гарантированной отдачи от зоны повышенной отдачи. Состоит из двух ветвей: 1) ветви опорожнения (сработки), ограничивающей упомянутую зону в период межени и не допускающей чрезмерной сработ

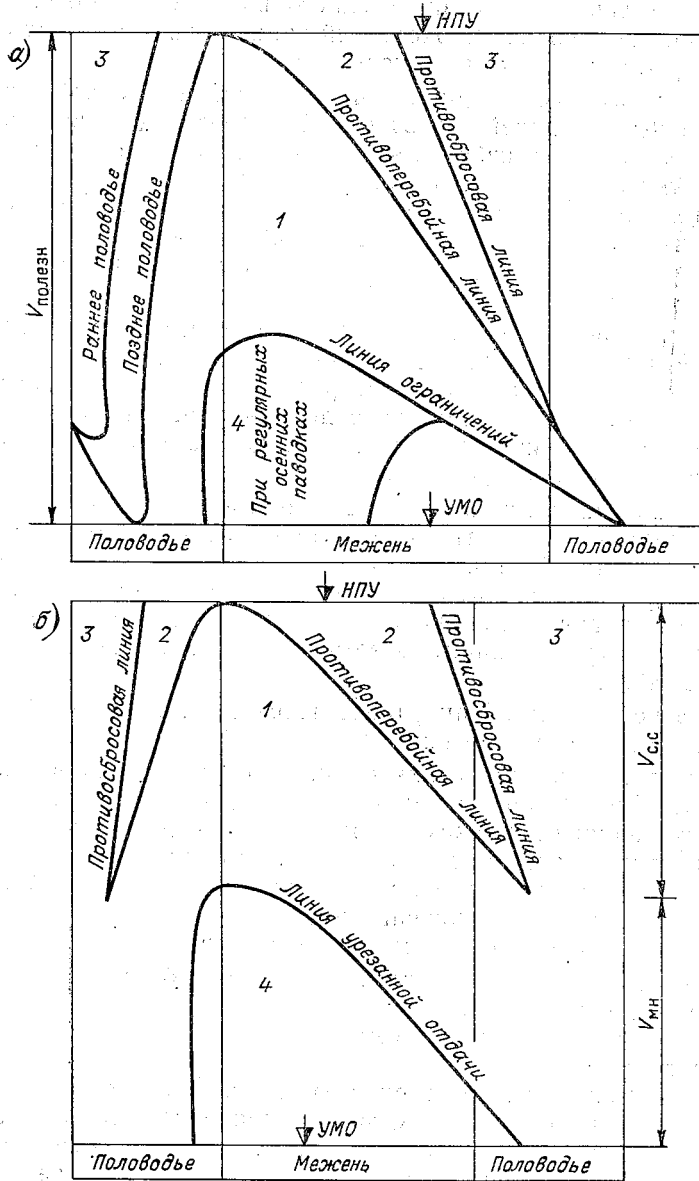


Рис. 14.1. Вид диспетчерского графика при сезонном (а) и многолетнем (б) регулировании стока.

1 — зона гарантированной водо- или энергоотдачи; 2 — зона повышенной отдачи; 3 — зона полной производительности установки; 4 — зона ограничений.

ки водохранилища, 2) ветви весеннего наполнения, обеспечивающей к концу половодья необходимый запас воды в водохранилище для поддержания отдачи в межень.

2. Противосбросовая линия, представляющая собой нижнюю границу зоны с отдачей, повышенной в пределах максимального водопотребления (во избежание сбросов). Состоит из двух ветвей: 1) ветви предполоводного опорожнения, обеспечивающей сработку к началу половодья всего полезного объема водохранилища для аккумуляции высоких вод; 2) ветви наполнения, предотвращающей чрезмерно быстрое заполнение водохранилища (во избежание сбросов).

3. Линия урезанной, или пониженной, отдачи, представляющая собой нижнюю границу гарантированной отдачи.

Противоперебойная и противосбросовая линии своими ветвями охватывают 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 и противосбросовой линий строятся от НПУ до уровня ежегодной сработки водохранилища $Z_{\text{еж. сб}}$ (до УМО — при сезонном регулировании и до уровня опорожнения сезонной составляющей — при многолетнем регулировании), а ветви сработки тех же линий — от $Z_{\text{еж. сб}}$ до НПУ.

При расчете и построении диспетчерских графиков необходимы следующие исходные данные:

1. Основные характеристики плана водохозяйственного использования (гарантированная водо- и энергоотдача и распределение ее на протяжении года; расход полной производительности гидроузла; масштабы осуществляемого регулирования стока; требования водопользователей и водопотребителей, заданные, как правило, в виде системы ограничений и др.).

2. Размеры полезного объема водохранилища.

3. Гидрологическая характеристика водотока в створе гидроузла за весь период наблюдений.

4. Характеристика ожидаемых прогнозов стока (их заблаговременность и точность).

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

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 срабатываемого полезного объема |
| б) ветвь наполнения | Половодье расчетной обеспеченности p (P_p) | » | С конца половодья «ходом назад» от уровня НПУ или наполняемого полезного объема |
| 2. Противосбросовая | | | |
| а) ветвь сработки | Многоводная межень (как правило, зимняя) обеспеченностью (по стоку) $p' = 100 - p$ | Полная пропускная способность ГЭС или установки | С конца межени «ходом назад» от уровня УМО или срабатываемого полезного объема |
| б) ветвь наполнения | Половодье обеспеченностью $p' = 100 - p$ | То же | С конца половодья «ходом назад» от уровня НПУ или наполняемого полезного объема |

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) | » | С конца половодья «ходом назад» от уровня НПУ или наполненного полезного объема |
| 2. Противобросовая | | | |
| а) ветвь сработки | Многоводная межень (как правило, зимняя) обеспеченностью (по стоку) $p' = 100 - p$ | Полная пропускная способность ГЭС или установки | С конца межени «ходом назад» от уровня ежегодной сработки или сработанной сезонной составляющей полезного объема |
| б) ветвь наполнения | Половодье обеспеченностью $p' = 100 - p$ | То же | С конца половодья «ходом назад» от уровня НПУ или наполненного полезного объема |
| 3. Зона ограничений | Межень года со стоком, равным отдаче | Гарантированная | С конца межени «ходом назад» от уровня УМО или сработанного полезного объема |

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 получают 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.

Построенные указанным путем отдельные элементы сводятся в единый диспетчерский график, на основе которого осуществляются расчеты регулирования и эксплуатации водохранилища. При этом отдача из водохранилища назначается в зависимости от времени года и от запаса воды в водохранилище на данную дату пуска.

В процессе регулирования речного стока по длительному наблюдённому или смоделированному ряду возможны некоторые уточнения зон диспетчерского графика с учетом реального распределения стока как внутри года, так и по годам.

14.2. Диспетчерские графики управления работой водохранилищ сезонного регулирования стока и принципы их построения

Методика разработки диспетчерских графиков управления работой водохранилищ сезонного (годового) регулирования стока изложена в п. 14.1. Ниже излагается один из практических приемов расчета, построений и компоновки диспетчерского графика управления работой водохранилища ГЭС годового регулирования стока на одной из сибирских рек.

Основные гидрологические характеристики водотока в створе гидроузла за период наблюдений:

| | |
|---|---|
| Средний расход воды | $\bar{Q}_Г = 1480 \text{ м}^3/\text{с}$ |
| Среднегодовой сток | $\bar{W} = 46,7 \text{ км}^3$ |
| Коэффициент изменчивости годового стока | $C_{вГ} = 0,15$ |
| Средний сток межени (X—IV) | $\bar{W}_М = 8,65 \text{ км}^3$ |

Коэффициент изменчивости стока межени $C_{\sigma M} = 0,17$
 Средний сток половодья $\bar{W}_П = 26,4 \text{ км}^3$
 (IV — 3, V, VI)

Коэффициент изменчивости стока фазы половодья . . . $C_{\sigma П} = 0,15$
 Параметры водохранилища и ГЭС на момент разработки графика приняты следующие:

Нормальный подпорный уровень 540 м
 (НПУ)
 Уровень мертвого объема (УМО) 500 м
 Полезный (регулирующий) объем = 15,8 км³
 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 в целях его упрощения не учитывались. Однако в процессе проектирования они подлежат обязательному учету. Для этого в нижеприведенных расчетных таблицах вводятся дополнительные графы.

Таблица 14.3

Годы со стоком межени, близким к $W_{MP} = 6,36 \text{ км}^3$

| Год | 1910-11 | 1912-13 | 1929-30 | 1933-34 | 1953-54 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| Объем стока межени, км ³ | 5,93 | 8,68 | 9,85 | 7,25 | 6,31 |
| Коэффициент приведения к W_{MP} | 1,07 | 0,73 | 0,65 | 0,88 | 1,01 |

Таблица 14.4

Расчет ветви сработки противоперебойной линии

| Год | Месяц — декада | Расходы, м ³ /с | | | Объемы, км ³ | | Уровень водохранилища на конец месяца (декады), м |
|------|----------------|----------------------------|-------------|--|-------------------------|-------------------------------------|---|
| | | средний наблюденный | приведенный | Дефицита до $Q_{\text{гар}} = 1140 \text{ м}^3/\text{с}$ | 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 | 24,90 | 528,1 |
| | II | 230 | 246 | 894 | 2,27 | 22,63 | 522,5 |
| | III | 206 | 220 | 920 | 2,35 | 20,28 | 515,4 |
| | IV-1 | 140 | 150 | 990 | 2,42 | 17,86 | 507,2 |
| | IV-2 | 308 | 330 | 810 | 0,85 | 17,01 | 503,9 |
| IV-3 | 734 | 786 | 354 | 0,70 | 16,31 | 501,2 | |
| | | | | | 0,31 | 16,0 | 500,0 |

Расчеты выполнялись в следующем порядке.

1. Противоперебойная линия — ветвь сработки. Для расчета ветви сработки противоперебойной линии отобраны годы со стоком межени, близким к $W_{\text{мр}}=6,36 \text{ км}^3$, ($W_{\text{мр}}$ — сток межени расчетной обеспеченностью 95%), включенных в таб. 14.3.

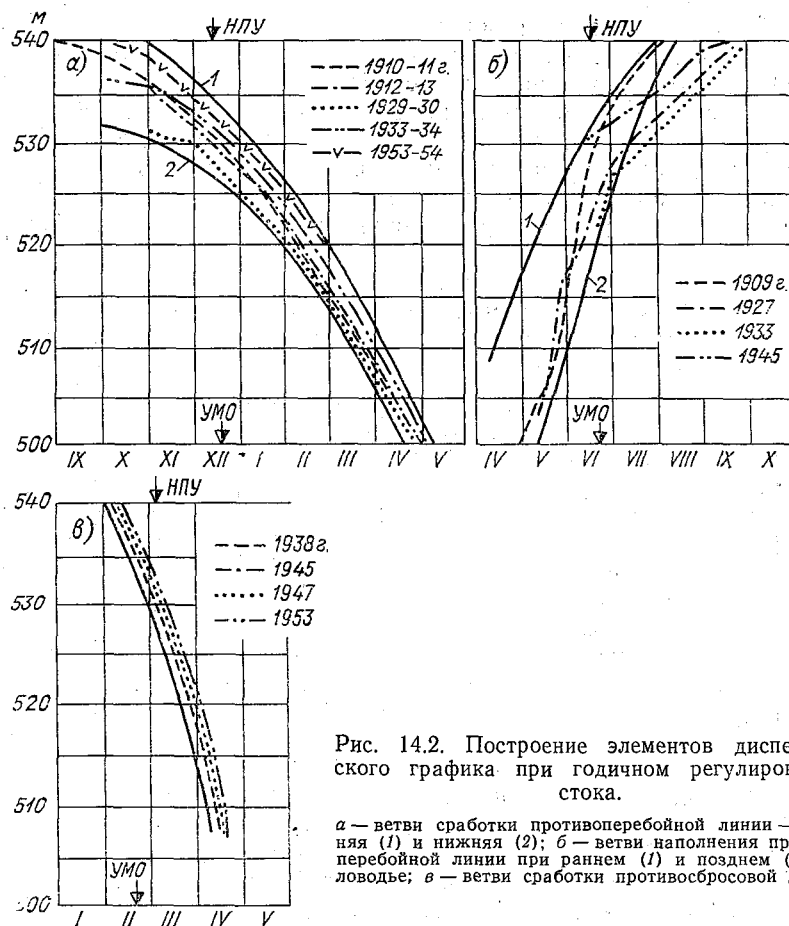


Рис. 14.2. Построение элементов диспетчерского графика при годовном регулировании стока.

а — ветви сработки противоперебойной линии — верхняя (1) и нижняя (2); *б* — ветви наполнения противоперебойной линии при раннем (1) и позднем (2) половодье; *в* — ветви сработки противосбросовой линии.

Сток перечисленных межени приведен к $W_{\text{мр}}$ путем умножения на соответствующие коэффициенты. В табл. 14.4 дан пример подобной приводки стока и расчета линии сработки за 1910-11 г. Расчет ведется «ходом назад» от отметки, соответствующей УМО 500 м с момента, когда расходы на подъеме половодья равны $Q_{\text{гар}} = 1140 \text{ м}^3/\text{с}$. Наполнение водохранилища начинается с объема, соответствующего УМО 500 м, т. е. с мертвого объема.

Полученные расчетом наполнения водохранилища (на конец расчетных интервалов), необходимые для обеспечения гарантированной отдачи, наносятся на график (рис. 14.2). Как видно из

этого графика, каждому году отвечает своя линия наполнения и в совокупности этими линиями обрисовывается довольно широкая полоса. Верхняя огибающая всех построенных линий и принимается за ветвь сработки противоперебойной линии.

Нижняя огибающая приведенных кривых принята за границу зоны ограничений.

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. Для упрощения расчеты проведены без разбивки их на ранние и поздние половодья. Порядок расчета можно проследить по табл. 14.5, в которой приведен пример, относящийся к по-

Таблица 14.5

Расчеты ветви наполнения противоперебойной линии

| Год | Месяц — декада | Расход, м³/с | | Объем, км³ | | Уровень водохранилища на конец месяца (декады), м |
|------|-----------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-------------------------------------|---|
| | | приведенный | превышение над $Q_{гар} = 1140$ м³/с | аккумуляции | наполнения на конец месяца (декады) | |
| 1909 | V ₁ | 2310 | 1170 | 1,02 | 16,24 | 501,0 |
| | V ₂ | 1630 | 490 | 0,42 | 17,26 | 504,9 |
| | V ₃ | 4220 | 3080 | 2,66 | 17,68 | 506,5 |
| | VI ₁ | 4570 | 3430 | 2,96 | 20,34 | 515,5 |
| | VI ₂ | 3520 | 2380 | 2,06 | 23,30 | 524,4 |
| | VI ₃ | 3780 | 2640 | 2,28 | 25,36 | 529,1 |
| | VII | 2490 | 1350 | 3,55 | 27,64 | 533,5 |
| | VIII | 1320 | 180 | 0,15 | 31,19 | 539,8 |
| | | | | | 31,34 | 540,0 |

ловодью 1909 г. Наполнение водохранилища начинается с объема 31,34 км³, т. е. с объема при НПУ 540 м. (полного объема водохранилища). Результаты нанесены на график рис. 14.2.

Исходя из расчетов удалось выделить две характерные даты начала половодья: для раннего — 10/IV, для позднего — 10/V. В соответствии с установленными датами начала половодья проведена верхняя и нижняя огибающие. Верхняя огибающая принимается за ветвь наполнения противоперебойной линии соответственно раннего половодья, нижняя — позднего половодья.

3. Противосбросовая линия — ветвь наполнения. Построение ветви наполнения противосбросовой линии обычно производится по стоку половодья при обеспеченности $p' = 100 - p = 100 - 95 = 5$ %. В нашем примере, в целях возможного большего сокращения холостых сбросов построение ветви наполнения противосбросовой линии производилось по стоку половодий при обеспеченности 0,1 %. Объем половодья принятой обеспеченности равен

39,6 км³. Если допустить работу гидроузла с полной производительностью $Q_B=2500$ м³/с в течение всей фазы (IV—3, V, VI), то будет использован сток в объеме 15,1 км³. В сумме с аккумулярованным стоком в водохранилище общий объем используемого стока за фазу половодья составит $15,1 + 15,3 = 30,4$ км³, что меньше притока (39,6 км³). Таким образом, часть воды высокого половодья неизбежно будет сброшена вхолостую.

Вследствие такого соотношения между используемым стоком и притоком к водохранилищу ветвь наполнения противосбросовой линии почти целиком будет располагаться ниже соответствующей ветви противоперебойной линии. Поэтому дополнительными расчетами пропуска высоких половодий (подробнее см. п. 15.4), которые здесь не приводятся, ветвь наполнения была выведена на диспетчерском графике на отметку 535 м к началу третьей декады июня.

4. Противосбросовая линия — ветвь сработки. Построение ветви сработки противосбросовой линии производилось по данным пяти выбранных из исходного ряда лет с многолетней меженью. Необходимости приведения стока их к расчетному значению обеспеченностью 5 % в нашем примере не было, так как сток в период ледостава принятого водотока оказался весьма стабильным. Это подтверждается плотностью расположенных ветвей сработок на графике (см. рис. 14.3).

Расчет ветвей сработок выполнен «ходом назад» от отметки 508 м, соответствующей сработке водохранилища к началу принятого раннего половодья. Порядок расчета виден в табл. 14.6, в которой дан пример, относящийся к зиме 1938 г.

Таблица 14.6

Расчет ветви сработки противосбросовой линии

| Год | Месяц—декада | Расход, м ³ /с | | Объем, км ³ | | Уровень водохранилища на конец месяца (декады); м |
|------|-----------------|---------------------------|---|------------------------|-------------------------------------|---|
| | | наблюденный | превышение над $Q_B=2500$ м ³ /с | аккумуляции | наполнения на конец месяца (декады) | |
| 1938 | II | 339 | 2161 | 5,69 | 32,29 | 540,7 |
| | III | 303 | 2197 | 5,78 | 26,60 | 531,4 |
| | IV ₁ | 515 | 1985 | 1,71 | 20,82 | 517,0 |
| | IV ₂ | 1313 | 1187 | 1,02 | 19,11 | 511,4 |
| | | | | | 18,09 | 508,0 |

Результаты нанесены на график (см. рис. 14.2). За ветвь сработки противосбросовой линии принята нижняя огибающая.

5. Компоновка диспетчерского графика. Все линии, построение которых изложено выше, совмещены на графике рис. 14.3. В результате получен диспетчерский график управления работой водохранилища для годичного (глубокого сезонного) регулирования.

В некоторых случаях, при значительных навигационных попусках, возникает необходимость в выделении зоны навигационных попусков. Вид такого диспетчерского графика приведен на рис. 14.4. Ветвь наполнения противоперебойной линии рассчитывается и строится аналогичным способом. Что касается ветви сработки противоперебойной линии, то часто она определяется подбором на постоянную среднюю гарантированную мощность за период сработки водохранилища. Порядок такого расчета приведен в п. 11.7. Диспетчерский график управления работой водохранилища ГЭС

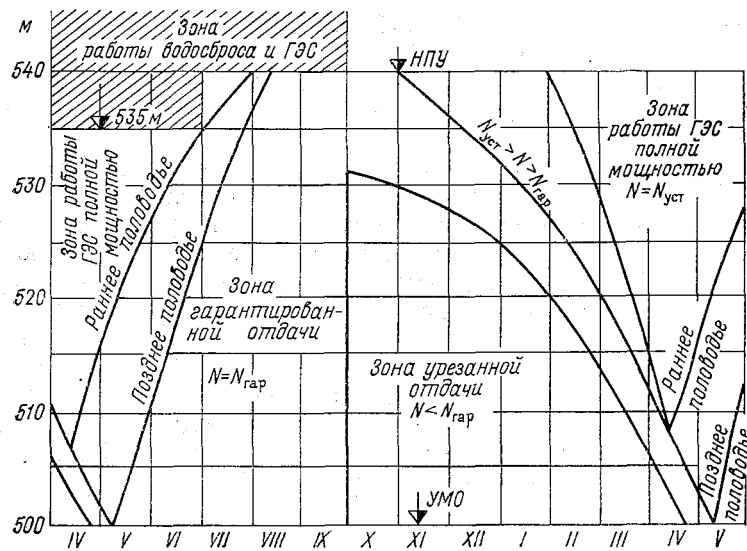


Рис. 14.3. Диспетчерский график управления работой водохранилища ГЭС годового регулирования стока.

лища неглубокого сезонного регулирования стока комплексного назначения приведен на рис. 14.5. Построение противоперебойной линии произведено способом, аналогичным годовому регулированию. Разница только в том, что ветвь сработки противоперебойной линии охватывает не весь полезный объем ($4,4 \text{ км}^3$), а только его часть ($2,68 \text{ км}^3$), остающуюся на начало зимней сработки (за вычетом $1,72 \text{ км}^3$, сбрасываемого в период навигационных попусков и обеспечения нормальной работы водозаборов в нижнем бьефе).

Ветвь сработки противосбросовой линии при устойчивом притоке в период зимней межени рассчитываем следующим упрощенным способом. Абсциссу конца противосбросовой линии выводим на 31/III. По формуле (14.1) определяем период сработки диспетчерского объема водохранилища

$$T = \frac{\Delta V_{\text{д}} + Q_{\text{пррп}} \Delta t}{Q_{\text{в}} \Delta t} = \frac{4,0 + 595,5 \cdot 2,63 \cdot 10^6}{3000 \cdot 2,63 \cdot 10^6} = 1,5 \text{ месяца}, \quad (14.1)$$

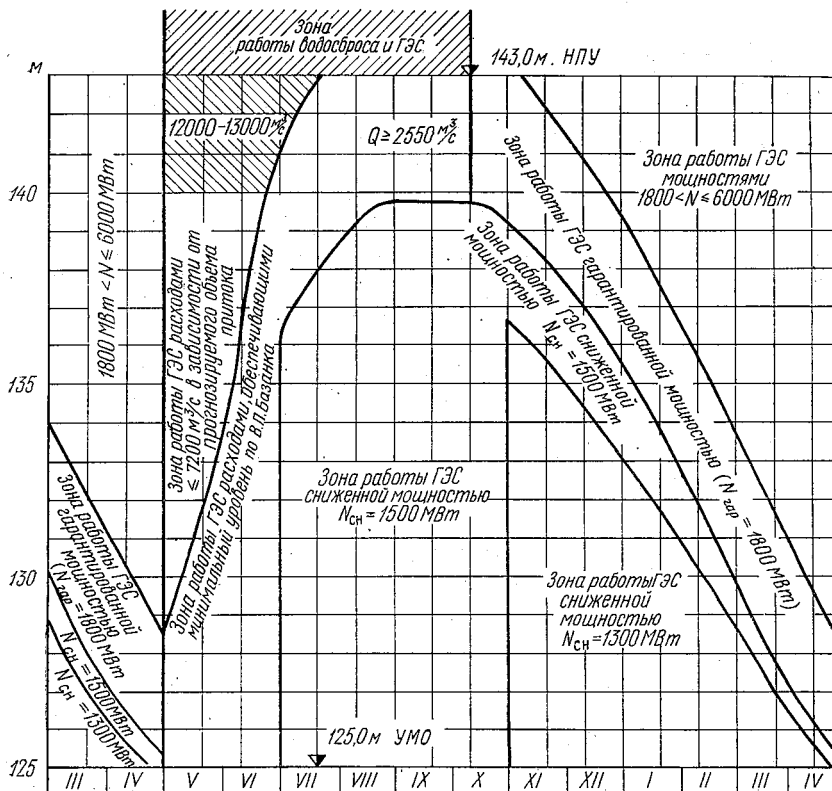


Рис. 14.4. Диспетчерский график управления работой водохранилища неглубокого многолетнего регулирования стока.

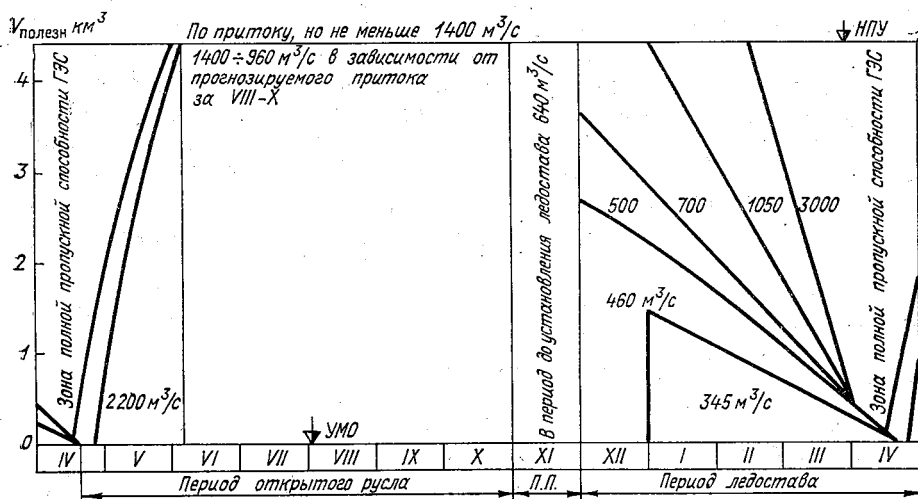


Рис. 14.5. Диспетчерский график управления работой водохранилища неглубокого сезонного регулирования стока (п. п. — переходной период).

где ΔV_d — объем диспетчерской сработки водохранилища ($V_{\text{полезн}} - V_{31/III}$), исходя из принятой сработки водохранилища на 31/III; $Q_{\text{пр. ср}}$ — средний расход притока обеспеченностью $p_1 = 100 - p = 100 - 95 = 5\%$; Q_v — максимальная пропускная способность ГЭС. Вычитая из абсциссы конца противосбросовой линии (31/III) величину T , находим абсциссу ее начала (15/II).

Зону избытков, расположенную между ветвями сработки противоперебойной и противосбросовой линий, иногда делят на более мелкие подзоны, в пределах которых отдача поддерживается равной расходу, определенному по формуле

$$Q = (\Delta V_d + Q_{\text{пр. ср}} \Delta t) / T, \quad (14.2)$$

где ΔV_d — разность ординат начала и конца сработок соответствующих линий (определяется при заданном T , исходя из сработки на 31/III), T — период сработки ΔV_d , $Q_{\text{пр. ср}} \Delta t$ — средний сток за период сработки T .

14.3. Диспетчерские графики при многолетнем регулировании стока и принципы их построения

Назначение диспетчерских графиков управления работой водохранилищ, подробное описание его зон и характерных линий дано в п. 14.1. Рассмотрим особенности диспетчерских графиков при многолетнем регулировании стока. Общий вид его дан на рис. 14.1. Из рисунка видно, что основные линии диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока (противоперебойная и противосбросовая) охватывают своими линиями не весь полезный объем водохранилища, а только его сезонную составляющую $V_{с.с}$ и проводятся от НПУ до уровня обязательной предполоводной сработки, соответствующего сработанной сезонной составляющей.

Характеристика стока фаз, используемого для расчета характерных линий диспетчерского графика, приведена в табл. 14.2.

Порядок расчета и построений характерных линий диспетчерского графика при многолетнем регулировании тот же, что и при сезонном регулировании.

Пример расчета, построений и компоновки диспетчерского графика при многолетнем регулировании

Исходные данные:

| | |
|---|---|
| Средний расход воды | $\bar{Q}_r = 560 \text{ м}^3/\text{с}$ |
| Среднегодовой сток | $\bar{W}_r = 17,6 \text{ км}^3$ |
| Коэффициент изменчивости годового стока | $C_{\sigma_r} = 0,15$ |
| Нормальный подпорный уровень (НПУ) | 850 м |
| Уровень сработки (УМО) | 810 м |
| Уровень ежегодной сработки | 834 м |
| Полезный объем водохранилища | $V_{\text{полезн}} = 13,6 \text{ км}^3$ |
| в том числе сезонная составляющая | $V_{с.с} = 7,1 \text{ км}^3$ |

Коэффициент регулирования $\alpha = 0,94$
 Установленная мощность $N_{уст} = 1500$ тыс. кВт
 Гарантированная мощность обеспеченностью 95 % $N_{гар} = 696$ тыс. кВт
 Гарантированный расход $Q_{гар} = 526$ м³/с

Потери воды из водохранилища для упрощения не учитываются.

Расчеты выполняются в следующем порядке:

1. Противоперебойная линия. Для расчета противоперебойной линии отобраны годы со среднегодовыми расходами, близкими к отдаче $\alpha Q_{г} = 0,94 \times 560 = 526$ м³/с, включенные в табл. 14.7.

Таблица 14.7

| Годы со среднегодовыми расходами воды, близкими к $\alpha Q_{г} = 526$ м ³ /с | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Год | 1958-59 | 1960-61 | 1962-63 | 1976-77 |
| Среднегодовой расход, м ³ /с | 530 | 553 | 534 | 519 |
| Коэффициент приводки к 526 м ³ /с | 0,99 | 0,95 | 0,98 | 1,01 |

В табл. 14.8 дан пример расчета противоперебойной линии за 1958-59 г. Расчет ведется «ходом назад» от уровня ежегодной сработки (соответствующего сработанной сезонной составляющей

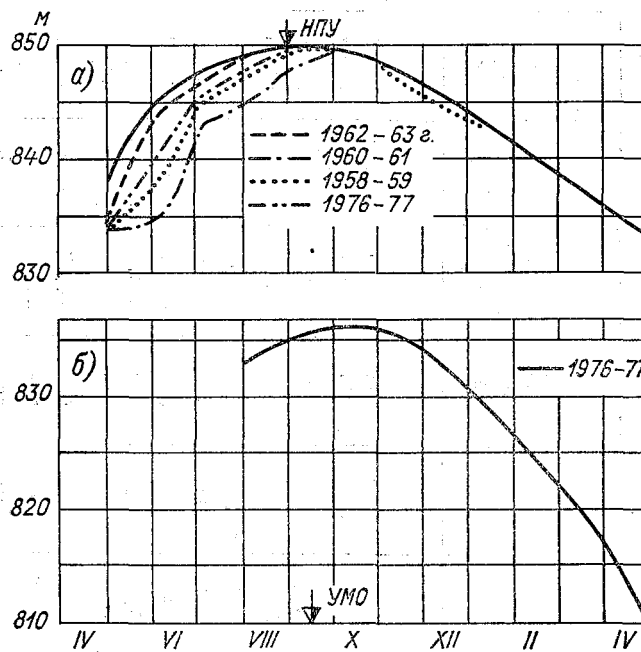


Рис. 14.6. Построение элементов диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока.
 а — противоперебойная линия; б — линия ограничений.

Расчет противоперебойной линии

| Год | Месяц | Расход, м ³ /с | | | Объем, км ³ | | Уровень голохани- лища, м | | Уровень нижнего бьефа $Z_{н.б.}$ м | Напор, м | | Гарантированная мощ- ность $N_{гп}$ тыс. кВт (МВт) |
|---------|-------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|
| | | $Q_{ест}$ | зарегулирован- ный $Q_{гпс}$ | $Q_{акв} = Q_{ест} -$ $- Q_{гпс}$ | аккумуляции $V_{акв}$ | наполнения во- дохранилища на конец месяца | на конец меся- ца $Z_{к}$ | на средину ме- сяца $Z_{ср}$ | | $H_{гп} = Z_{ср} - Z_{н.б.}$ | $H_{нето} = Z_{гп} -$ $- 1,5 м$ | |
| 1958-59 | V | 1025 | 532 | 493 | 1,20 | 11,93 | 834,0 | 835,5 | 683,1 | 152,4 | 150,9 | 696 |
| | VI | 1733 | 500 | 1233 | 3,24 | 13,13 | 837,0 | 840,5 | 683,1 | 157,4 | 155,9 | 696 |
| | VII | 931 | 496 | 435 | 1,14 | 16,37 | 844,0 | 845,5 | 683,1 | 162,4 | 160,9 | 696 |
| | VIII | 804 | 480 | 324 | 0,85 | 17,51 | 847,0 | 847,5 | 683,0 | 164,5 | 163,0 | 696 |
| | IX | 588 | 480 | 108 | 0,28 | 18,36 | 849,0 | 848,5 | 683,0 | 165,5 | 164,0 | 696 |
| | X | 324 | 490 | -166 | -0,44 | 18,64 | 848,0 | 848,5 | 683,0 | 164,5 | 164,0 | 696 |
| | XI | 149 | 500 | -351 | -0,92 | 18,20 | 848,0 | 847,0 | 683,0 | 163,9 | 162,4 | 696 |
| | XII | 126 | 500 | -374 | -1,00 | 17,28 | 846,0 | 845,0 | 683,1 | 161,9 | 160,4 | 696 |
| | I | 102 | 508 | -406 | -1,07 | 61,28 | 844,0 | 843,0 | 683,1 | 159,9 | 158,4 | 696 |
| | II | 73 | 520 | -447 | -1,18 | 15,21 | 842,0 | 840,5 | 683,1 | 157,4 | 155,9 | 696 |
| | III | 68 | 528 | -460 | -1,21 | 14,03 | 839,0 | 837,5 | 683,1 | 154,4 | 152,9 | 696 |
| | IV | 315 | 532 | -217 | -0,82 | 12,82 | 836,0 | 835,0 | 683,1 | 151,9 | 150,4 | 696 |

Примечания. 1. Естественные расходы приведены к отладе путем умножения на коэффициент 0,99 (из табл. 14.7).
2. Зимний коэффициент равен 1,0, поэтому $Z_{н.б.}$ в зимний период определены по легкой кривой.

Таблица 14.9

Расчет линии ограничения

| Год | Месяц | Расход, м³/с | | | Объем, км³ | | Уровень водоохрани- лища, м | | Уровень нижнего бьефа $Z_{н.б}$, м | Напор, м | | Гарантированная мощ- ность $N_{гар}$ тыс. кВт |
|---------|-------|--------------|---------------------------------|-------------------------------|------------|--|--------------------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|----------------------------|--|
| | | $Q_{ест}$ | зарегулирован- ный $Q_{гэс}$ | $Q_{гкк} = Q_{гэс} - Q_{гэс}$ | $V_{гкк}$ | наполнения во- дохранилища на конец месяца | $Z_{к}$ на конец месяца | на среднюю ме- сяца $Z_{ср}$ | | $H_{гп} = Z_{ср} - Z_{н.б}$ | $H_{нетто} = H_{гп} - 1,5$ | |
| 1976-77 | VIII | 1062 | 520 | 542 | 11,92 | 833 | 835 | 683,1 | 151,4 | 150,4 | 696 | |
| | IX | 580 | 480 | 100 | 13,34 | 837 | 837 | 683,0 | 154,0 | 152,5 | 696 | |
| | X | 310 | 520 | -210 | 13,06 | 835 | 836 | 683,0 | 153,0 | 151,5 | 696 | |
| | XI | 104 | 536 | -432 | 11,91 | 834 | 834 | 683,2 | 150,8 | 149,3 | 696 | |
| | XII | 86 | 550 | -464 | 10,69 | 830 | 832 | 683,2 | 148,8 | 147,3 | 696 | |
| | I | 105 | 558 | -453 | 9,50 | 827 | 828 | 683,2 | 144,8 | 143,3 | 696 | |
| | II | 85 | 570 | -485 | 8,22 | 822 | 824 | 683,2 | 140,8 | 139,3 | 696 | |
| | III | 79 | 592 | -513 | 6,87 | 817 | 802 | 683,3 | 136,7 | 135,2 | 696 | |
| | IV | 104 | 624 | -520 | 5,50 | 810 | 813 | 683,3 | 129,7 | 128,2 | 696 | |

объема) 834 м, исходя из сохранения постоянной гарантированной мощности 696 тыс. кВт.

При неизвестных наполнении водохранилища на начало расчетного интервала (месяца), а следовательно, и напоре H расход ГЭС определяется методом подбора в порядке, изложенном в п. 11.5. При необходимости расчета противоперебойной линии на постоянный зарегулированный расход $Q_{ГЭС}$ надобность в таком подборе отпадает.

Полученные уровни (наполнения) водохранилища на конец расчетных интервалов, необходимые для обеспечения гарантиро-

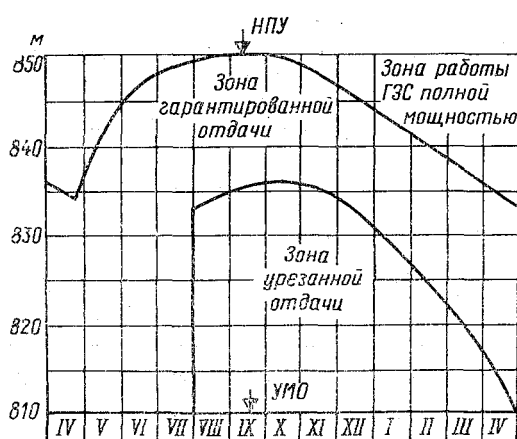


Рис. 14.7. Диспетчерский график управления работой водохранилища ГЭС многолетнего регулирования стока.

ванной отдачи, наносятся на график (рис. 14.6). Как видно из этого графика, каждому году отвечает своя линия наполнения водохранилища. Верхняя огибающая всех построенных линий и принимается за противоперебойную линию. Ординаты ее располагаются в зоне сезонной составляющей объема водохранилища от НПУ (850 м), до уровня ежегодной сработки (834 м).

2. Зона ограничений. Линия ограничений, являющаяся границей между зонами гарантированной и урезанной водоотдачи, строится по году со стоком, равным отдаче, также «ходом назад» от УМО (810 м) в зоне многолетней составляющей объема водохранилища.

В табл. 14.9 приводится расчет линии ограничения по 1976-77 г. Предварительно сток этого года приведен к гарантированной отдаче путем умножения значений среднемесячных расходов на коэффициент приводки 1,01 (из табл. 14.7). Рассчитанная линия показана на рис. 14.6.

3. Противосбросовая линия. Порядок расчета противосбросовой линии полностью совпадает с расчетом аналогичной линии на

диспетчерском графике при сезонном регулировании. Разница заключается лишь в том, что при многолетнем регулировании противобросовая линия строится от уровня ежегодной сработки водохранилища до НПУ. В нашем примере, для упрощения, расчет ее не производится.

4. Компоновка диспетчерского графика. Все линии, построение которых изложено выше, помещены на рис. 14.7. В результате получаем диспетчерский график управления работой водохранилища для многолетнего регулирования стока.

Конфигурация диспетчерских графиков и особенно количество подзон в каждой зоне его может быть весьма различной. Все определяется назначением водохранилища комплексного использования стока, но методология разработки его остается единой.

14.4. Использование прогнозов стока для повышения эффективности работы водохранилищ

Диспетчерские графики рассмотренного выше типа уже сами по себе обеспечивают достаточно высокую эффективность работы водохранилищ и гидроузла в целом.

Гидрологические прогнозы, разрабатываемые и выпускаемые Комитетом по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Министерства экологии и природных ресурсов Российской Федерации, играют в настоящее время лишь вспомогательную роль при эксплуатации водохранилищ энергетических и водохозяйственных систем. Это связано с их небольшой заблаговременностью и недостаточной достоверностью.

Тем не менее учет прогнозов стока позволяет уточнять даваемые диспетчерскими графиками решения, что позволяет получать дополнительный эффект использования стока.

Предвидя в процессе эксплуатации особенности предстоящего гидрологического режима водотока, можно заблаговременно принять меры против ожидаемых наводнений путем, например, углубленной сработки водохранилища или своевременного перехода на режим полной производительности установки; предусмотреть рациональный порядок расходования имеющихся запасов воды в водохранилище перед наступлением дефицитного по воде периода и т. п.

При реализации прогнозов из осторожности принимают во внимание не наиболее вероятные значения ожидаемого стока, а его значения, исправленные на вероятную ошибку прогноза. Последняя берется с таким знаком, который обеспечивает необходимый запас в результатах: с плюсом — при оценке многоводного стока и с минусом — при оценке маловодного.

Учет прогнозов при регулировании стока сводится к сопоставлению ожидаемого стока (с поправкой соответствующего знака) со стоком, определившим ту или иную линию диспетчерского графика. При превышении прогнозируемого стока над диспетчерским

появляется возможность использования дополнительных избытков, а при обратном соотношении, наоборот, появляется необходимость уменьшить используемый сток по сравнению со стоком, диктуемым диспетчерским графиком.

Порядок применения прогноза можно проиллюстрировать следующим простым примером. Рассматриваются условия работы установки на 1 декабря. Принимается, что наполнение водохранилища на этот момент совпадает с положением противоперебойной линии диспетчерского графика. В случае отсутствия прогноза стока на декабрь отдача назначается равной гарантированному минимуму, указанному в зоне гарантированной отдачи диспетчерского графика. Но предположим, что прогноз стока на декабрь имеется и прогнозируемый сток равен $0,8 \text{ км}^3$ при стандартной ошибке $0,03 \text{ км}^3$. При расчете на обеспеченность 95 % из предсказуемых значений стока следует вычитать 1,64 стандартной ошибки прогноза. С учетом этого расчетное значение предсказуемого декабрьского стока оказывается равным $0,75 \text{ км}^3$.

Сток, принятый при построении диспетчерского графика, устанавливается как разность объема водохранилища, срабатываемого на протяжении декабря при поддержании уровня на диспетчерской линии (разность наполнений водохранилища по противоперебойной линии на начало и конец декабря), равного в рассматриваемом примере $0,9 \text{ км}^3$, и объема водоотдачи, гарантируемой за тот же промежуток времени, т. е. $W_{\text{гар}} = Q_{\text{гар}} \Delta t$. При $Q_{\text{гар}} = 535 \text{ м}^3/\text{с}$ объем водоотдачи за декабрь составил $1,43 \text{ км}^3$. Таким образом, для декабря диспетчерский сток оказался равным $0,53 \text{ км}^3$. Сопоставляя предсказанный и диспетчерский объемы стока, получаем разность, равную $0,75 - 0,53 = 0,22 \text{ км}^3$. Полученный результат показывает, что использование прогноза позволяет повысить отдачу установки, назначаемую в начале декабря по диспетчерскому графику, на $0,22 \text{ км}^3$, или на 15 %.

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, В. А. Седлер, 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 подтвердили 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 ВНИИЭ, 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).

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 оптими-

зации 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).

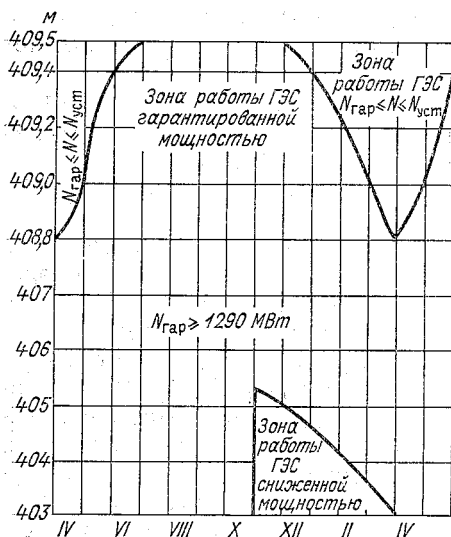


Рис. 14.8. Диспетчерский график работы водохранилища ГЭС-компенсатора при регулировании суммарной отдачи энергообъединения.

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.

Рассчитанный таким образом диспетчерский график приведен на рис. 14.8.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. С какой целью разрабатываются диспетчерские графики?
2. Каковы исходные данные для разработки диспетчерских графиков?
3. Порядок расчета и построения элементов диспетчерских графиков. В чем смысл этого порядка?
4. Каковы особенности разработки диспетчерских графиков управления работой водохранилищ многолетнего регулирования стока?
5. Как используются прогнозы стока для повышения эффективности работы водохранилищ?
6. Каковы в общих чертах принципы разработки способов управления режимами работы водохранилищ ГЭС в водохозяйственных и энергетических системах?

**РАСЧЕТ ПРОПУСКА ПОЛОВОДИЙ И ПАВОДКОВ
ЧЕРЕЗ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ****15.1. Задачи и средства регулирования стока половодий
и паводков**

Регулирование стока половодий и летне-осенних паводков производится в целях уменьшения максимальных расходов воды, пропускаемых в нижний бьеф сооружений. Этим достигается уменьшение числа водопропускных отверстий, т. е. снижение стоимости гидроузла, и предотвращение наводнений на участках рек, расположенных ниже гидроузла. При снижении максимальных расходов воды создаются благоприятные условия для развития прибрежных городов и населенных пунктов. Примером тому являются комплексные гидроузлы на реках Зее — Зейский, Енисее — Красноярский, Буре — строящийся Бурейский и др.

Регулирование половодного 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 глухой плотины его. В зависимости от топографической характеристики водохранилищ и располагаемого объема форсировка уровней над НПУ колеблется от 1 м (Бухтарминский гидроузел на р. Иртыше) до 5,5 м (Вилуйский гидроузел на р. Вилуе), а объем призмы 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 сработку (на спаде половодья или паводка).

Пропуск половодий и паводков осуществляется через отверстия, полезно использующие воду (гидротурбины, водозаборные сооружения) и сбрасывающие вхолостую (эксплуатационные водосбросы, судоходные шлюзы, рыбопропускные и т. д.). Расчет их пропускной способности производится известными методами речной гидравлики.

15.2. Статический и динамический объемы водохранилищ

Процесс работы водохранилища с точки зрения гидромеханики представляет собой неустановившееся движение жидкости в открытом русле неправильной формы. Корректный способ расчета работы водохранилища заключается в расчете неустановившегося движения воды путем совместного решения уравнений равновесия и неразрывности с разбивкой исследуемого протяжения реки на относительно короткие (однородные) участки и при этом для небольших временных интервалов. Такое решение, однако, было бы чрезвычайно трудоемким и практически трудно выполнимым. Поэтому практика расчета водохранилищ обычно исходит из радикального допущения, что объем водохранилища однозначно зависит от единственной координаты — уровня воды у плотины. При этом в большинстве случаев исходят из *статического объема*, понимая под ним объем, соответствующий наполнению подпорного бьефа до проектной отметки при горизонтальном уровне воды в водохранилище. Такой подход приемлем в тех случаях, когда объем, содержащийся в подпорном бьефе на прилегающем к плотине участке, в границах которого уровень воды практически горизонтален, значительно больше объема воды, размещающегося в движущемся потоке выше отметки подпора. Таковы, в частности, условия работы гидроузлов в периоды низкого стока. При прохождении по реке высоких половодий и паводков такое соотношение присуще лишь водохранилищам, образованным очень высокими плотинами, когда подпор у плотины значительно превышает подъем воды в реке при прохождении высоких половодий и паводков в естественных условиях. Неучет незначительной негоризонтальности водной поверхности водохранилища в этом случае практически не оказывает влияния на точность проводимых расчетов. В то же время расчеты пропуска половодий и паводков с использованием статических объемов водохранилища значительно упрощаются. Поэтому они широко используются в практике проектирования и эксплуатации гидроузлов.

При плотинах относительно небольшой высоты, когда подпор у плотины соизмерим с естественным подъемом уровня при прохождении половодий и паводков, негоризонтальность водной поверхности значительна. Неучет ее может привести к завышению ФПУ водохранилища или количества водопропускных отверстий.

В этом случае расчеты пропуска высоких половодий и паводков производятся по динамической кривой объемов водохранилища. Расчет и построение кривой объемов с учетом негоризонтальности водного зеркала является задачей речной гидравлики.

Чтобы определить *динамический объем* речного водохранилища, т. е. действительное количество содержащейся в нем при заданных условиях воды, необходимо, во-первых, знать не только подпорный уровень у плотины, но и отвечающее рассматриваемому моменту времени или другим заданным условиям положение кривой свободной поверхности на всем протяжении бьефа, от входного створа в верховом его конце до створа плотины; во-вторых, нужно располагать столь подробными топографическими характеристиками, чтобы находить общий объем водохранилища путем суммирования объемов отдельных небольших его участков, в пределах каждого из которых уровень воды (в среднем сечении участка отвечающий мгновенному положению кривой подпора) без существенной погрешности может быть принят горизонтальным.

Практическое применение этого наиболее точного способа определения динамического объема крайне затрудняется его трудоемкостью и необходимостью располагать данными об уровнях воды в большом числе створов. Способ значительно упрощается, если допустить, что точное совпадение расчетной (при определении динамического объема) и действительной кривых свободной поверхности водохранилища обязательно лишь в нескольких наиболее важных опорных его створах и что изменение уровня воды по длине бьефа между этими створами подчиняется определенной закономерности, единой для всех расчетных случаев. При этом допущении станет возможным, проведя заранее все громоздкие вычисления, номографировать подсчет динамического объема почти без ущерба для его точности по сравнению с подробным способом и сделать его широко доступным для проектной и эксплуатационной практики. Для примера на рис. 15.1 приведена номограмма динамического объема Куйбышевского водохранилища на участке Плотина — Камское устье.

Для случая открытого поверхностного водосброса и при условии прохождения высоких половодий и паводочных расходов при НПУ кривые динамических объемов могут быть построены еще более упрощенным способом. Для этого все протяжение водохранилища (от створа плотины до места выклинивания подпора) разбивается на ряд расчетных участков. Для каждого участка рассчитывается и строится кривая статических объемов (способ изложен в п. 7.4) и, например, опорная кривая Н. М. Бернадского. Для заданных уровней у плотины ($Z_{плт}$) (в пределах, как правило, от НПУ до ФПУ) и расхода воды ($Q_{плт}$) (без трансформации), с учетом его изменения на протяжении водохранилища, по опорным кривым Н. М. Бернадского устанавливаются уровни воды в начале и конце расчетных участков. По уровням воды в середине этих участков определяются соответствующие статиче-

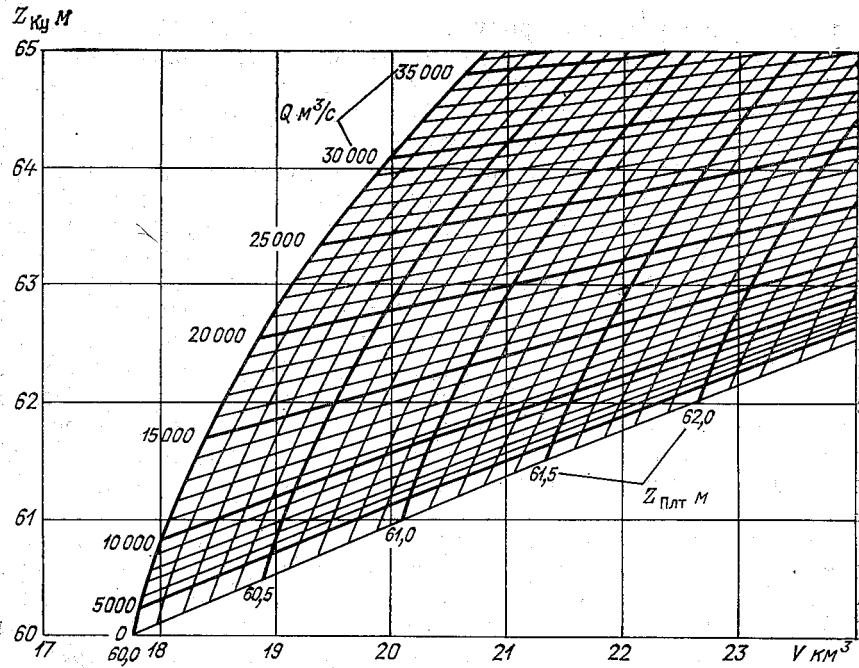


Рис. 15.1. Номограмма динамического объема Куйбышевского водохранилища на участке Плотина — Камское устье.

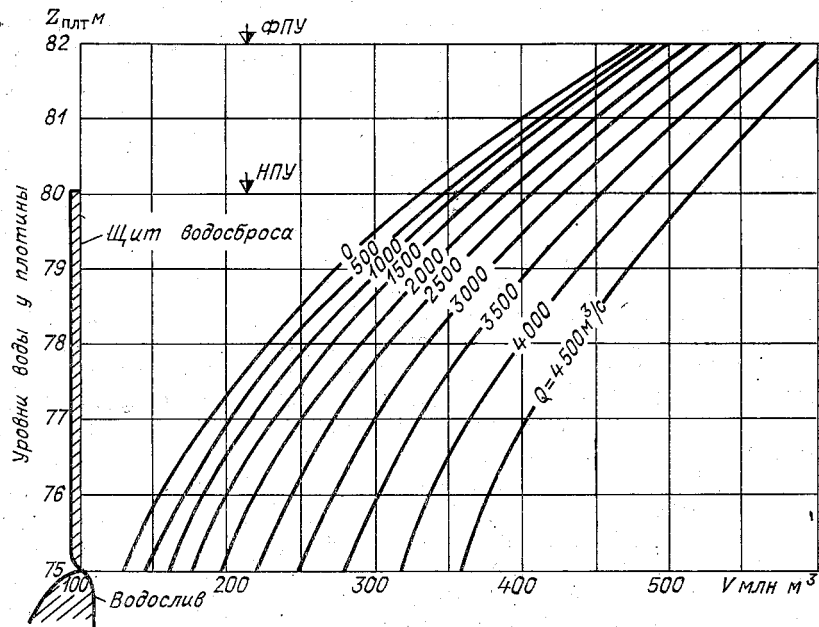


Рис. 15.2. Кривые динамических объемов водохранилища.

ские объемы по участкам. Сумма этих объемов принимается равной объему водохранилища (V) при данном очертании кривой свободной поверхности и относится к заданным $Z_{плт}$ и $Q_{плт}$. Объемы водохранилища при одном значении $Q_{плт}$, но разных значениях $Z_{плт}$ позволяют построить кривую динамических объемов водохранилища, а с учетом изменения и $Q_{плт}$ — семейство кривых динамических объемов водохранилища. Форма их приведена на рис. 15.2. Порядок расчета трансформации высоких половодий и паводков с применением статических и динамических объемов один и тот же.

15.3. Расчеты пропуска стока половодий и паводков через гидротехнические сооружения

Пропуск половодий и паводков через гидротехнические сооружения регламентируется следующими действующими нормативными документами:

1. Определение расчетных гидрологических характеристик СНиП 2.01.14—83, Москва, 1984 г.

2. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. СНиП 2.05.01—86

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 эксплуатационные водосбросные устройства при полном их открытии, все гидротурбины ГЭС и через другие водопропускные сооружения.

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.

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 |

Условия использования кривых статических или динамических объемов воды водохранилищ при расчетах пропуска половодий и паводков подробно изложены в п. 15.2.

Сброс воды из водохранилища производится через отверстия, предназначенные для пропуска полезно используемых расходов воды (гидроэлектростанция, шлюз, забор воды на водоснабжение и орошение) ($Q_{плт}$), и через отверстия, предназначенные для пропуска избыточной воды (водосливы и водоспуски) ($Q_{вс}$). 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 Δt ; Q_2 и q_2 — то же в конце его; $\Delta V = V_2 - V_1$ — приращение объема водохранилища за интервал Δt ; Q — средний расход притока за интервал Δt ; q — средний сбросной расход воды за интервал Δt ; Δt — расчетный интервал времени. Средний сбросной расход воды q представляет собой сумму средних расходов воды, пропускаемых через гидротурбины или другие отверстия, полезно использующие воду ($Q_{полезн}$), и средних расходов воды, сбрасываемых через водослив или водоспуск ($Q_{вс}$): $q = Q_{полезн} + Q_{вс}$.

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. Так

как приращение уровней у плотины на текущие Δt неизвестно, расчет пропуска половодья осуществляется методом последовательного приближения (подбора) в табличной форме (табл. 15.2)

Таблица 15.2

Расчет пропуска половодья вероятностью превышения 0,01 % с гарантийной поправкой через гидроузел НПУ 143 м, уровень ежегодной сработки 125 м, открытие водосброса с отм. 140 м, полная пропускная способность ГЭС 7200 м³/с

| Дата | Средний расход притока Q , м ³ /с | Средний расход ГЭС $Q_{ГЭС}$, м ³ /с | Средний расход водосброса $Q_{ВС}$, м ³ /с | Средний сбросной расход $q = Q_{ГЭС} + Q_{ВС}$, м ³ /с | Расход аккумуляции $Q_{акк} = Q - q$, м ³ /с | Объем аккумуляции $\Delta V_{акк} = Q_{акк} \Delta t$, км ³ | Наполнение водохранилища на конец Δt $V_K = V_H + \Delta V_{акк}$, км ³ | Уровень у плотины на конец Δt Z_K , м | Средний уровень у плотины $Z_{ср} = (Z_H + Z_K) / 2$, м |
|-------|--|--|--|--|--|---|--|--|--|
| 13/V | 6 020 | | | | | | 42,86 | 125 | |
| 14/V | 8 290 | 7200 | | 7 200 | 1 090 | 0,09 | 42,95 | 125,07 | |
| 15/V | 9 610 | 7200 | | 7 200 | 2 410 | 0,21 | 43,16 | 125,20 | |
| | | | | | | | | | |
| 7/VI | 36 000 | 7200 | | 7 200 | 28 800 | 2,49 | 68,39 | 140,48 | |
| 8/VI | 40 700 | 7200 | 5800 | 13 000 | 27 700 | 2,39 | 70,78 | 141,73 | 141,10 |
| 9/VI | 44 600 | 7200 | 5800 | 13 000 | 31 600 | 2,73 | 73,51 | 143,11 | 142,42 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

в следующей последовательности: на конец Δt задаются уровнем у плотины $Z_{K,з}$ и определяют средний уровень $Z_{ср} = (Z_H + Z_{K,з}) / 2$; 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 Δt равно $V_K = V_H + \Delta V_{акк}$; по V_K с кривой объемов снимают Z_K . Если Z_K не совпадает с $Z_{K,з}$, расчет повторяют до совпадения этих величин. По данным таблицы строят графики, приведенные на рис. 15.3.

При проектировании широко применяется графоаналитический метод трансформации половодий Потапова — Гильденבלата, позволяющий без подбора получить достаточно точное решение уравнения (15.2) и учесть изменение пропускной способности водосбросных сооружений, например водосливной плотины, при изменении уровня верхнего бьефа гидроузла. Метод основан на решении уравнения водного баланса (неразрывности) для водохранилища (15.1) путем ввода следующих упрощений.

Переписем уравнение (15.1) в следующем виде:

$$V_2 + 0,5q_2 \Delta t = Q_{cp} \Delta t + (V_1 + 0,5q_1 \Delta t) - q_1 \Delta t. \quad (15.3)$$

Если все члены левой и правой частей уравнения (15.3) разделить на Δt , то уравнение примет вид

$$0,5q_2 + V_2/\Delta t = Q_{cp} - 0,5q_1 + V_1/\Delta t = Q_{cp} + 0,5q_1 + V_1/\Delta t - q_1. \quad (15.4)$$

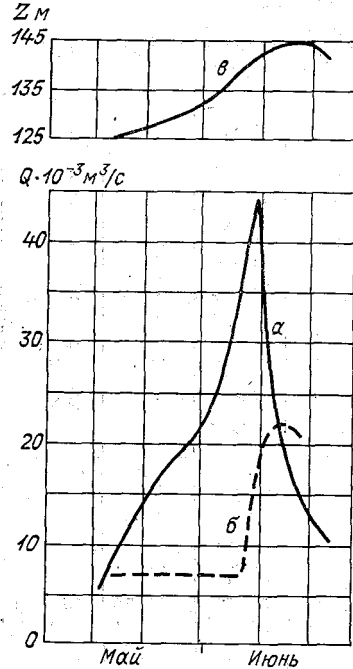


Рис. 15.3. Схема пропуска расчетного половодья.

а — гидрограф притока, б — график зарегулированных расходов воды, в — ход уровней водохранилища.

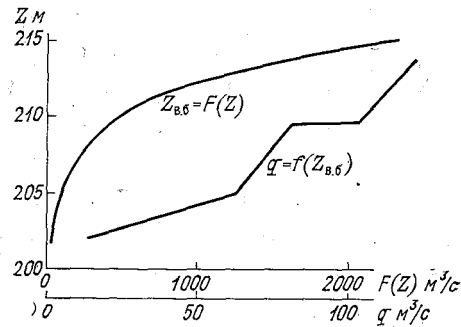


Рис. 15.4. Вспомогательная зависимость $Z_{в.б} = F(Z)$ и исходная зависимость $q = f(Z_{в.б})$ для бесподборного метода трансформации высоких паводков.

Все члены правой части уравнения для каждого интервала времени Δt известны из предыдущего расчета, так как в начальный момент первого интервала они определяются по исходным параметрам, а затем от одного интервала к другому передаются расчетом.

Введя в уравнение (15.4) обозначение $0,5q + V/\Delta t = F(Z)$, получим следующее расчетное уравнение:

$$F(Z_2) = F(Z_1) + Q_{cp} - q_1. \quad (15.5)$$

Таблица 15.3

Вычисление функции $Z_{в.б} = F(Z)$

| Уровень воды в водохранилище $Z_{в.б}$ м | Объем водохранилища V млн м ³ | $V/\Delta t$ м ³ /с ($\Delta t=1$ сут= =86400 с) | q м ³ /с | $0,5q$ м ³ /с | $F(Z) =$ $= V/\Delta t + 0,5q$ м ³ /с |
|--|--|--|-----------------------|--------------------------|--|
| 202,25 | 1,0 | 11,6 | 13,0 | 6,50 | 18,10 |
| 202,50 | 1,3 | 15,1 | 18,5 | 9,25 | 24,35 |
| 205,00 | 4,8 | 55,6 | 61,7 | 30,85 | 86,45 |
| | .. | ... | | | |

Расчеты трансформации половодья бесподборным способом ведутся также от интервала к интервалу. Для этого предварительно рассчитывается и строится зависимость $Z_{в.б} = F(Z)$. Пример расчета ее для одного из водохранилищ, запроектированных специалистами Гидропроекта, дан в табл. 15.3. Вспомогательная зависимость приведена на рис. 15.4. Там же приведена исходная зависимость $q = f(Z_{в.б})$. Расчет трансформации половодья проводится в форме табл. 15.4. Порядок расчета следующий. Задают начальный уровень водохранилища Z_n , равный либо НПУ, либо, как в данном случае, уровню обязательной предполоводной сработки — 202,25 м. По исходной зависимости $q = f(Z_{в.б})$ определяют $q_n (q_{14/IV})$, равное 13,0 м³/с.

По вспомогательной зависимости $Z_{в.б} = F(Z)$ и Z_n находят $F(Z)_n$, т. е. $F(Z)_{14/IV}$ и по уравнению рассчитывают $F(Z)_{15/IV} = F(Z)_{14/IV} + Q_{15/IV} - q_{14/IV} = 18,1 + 18,8 - 13,0 = 23,9$ м³/с. По $F(Z)_{15/IV}$ с графика снимают $Z_k (Z_{15/IV})$. Полученные значения Z_k и $F(Z)_k$ являются начальными для 16/IV и т. д.

Таблица 15.4

Расчет трансформации половодья водохранилищем

| Дата | Уровень водохранилища на конец Δt Z_k м | Средний приток в водохранилище Q м ³ /с | q м ³ /с | $F_2(Z) = F_1(Z) + Q - q_1$ |
|-------|--|---|-----------------------|-----------------------------|
| 14/IV | 202,25 | 13,0 | 13,0 | 18,1 |
| 15/IV | 202,50 | 18,8 | 18,8 | 23,9 |
| 16/IV | 202,75 | 25,9 | 26,5 | 31,0 |
| | | | | |

В результате расчетов пропуска половодий (паводка) различной обеспеченности и определения при этом максимальных зарегулированных расходов воды строят кривые обеспеченности максимальных естественных и зарегулированных расходов воды

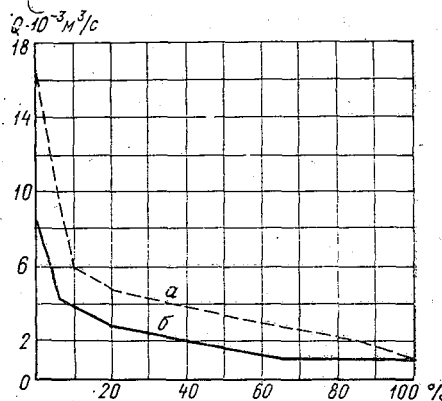


Рис. 15.5. Кривые обеспеченности максимальных расходов воды в створе гидроузла.
а — естественные расходы воды, б — зарегулированные.

в створе гидроузла (рис. 15.5). 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, рас-

положенных в каскаде, пропуск расхода воды основного расчетного случая не должен приводить к нарушению нормальной эксплуатации основных гидротехнических сооружений нижерасположенных 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 превышения) максимальных расходов воды и объемов стока приточности с участков водосбора, формирующих половодный или паводочный сток нормируемой вероятности превышения в замыкающем створе.

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

$$W_{2p} = W_{1p} + W_{б. пр. p(1-2)}, \quad (15.6)$$

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 ; $W_{б. пр. p(1-2)}$ — объем боковой приточности на участке 1—2 за тот же период неизвестной вероятности превышения $p(1-2)$.

Зная W_{2p} и W_{1p} , определяют $W_{б. пр. p(1-2)}$ и по кривой распределения объемов стока боковой приточности (параметры которой предварительно рассчитаны) снимают $p(1-2)$, соответствующую $W_{б. пр.}$

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. Расчеты притока сводятся к следующему.

1) По полному ряду наблюдений за стоком определяют статистические параметры максимальных расходов и объемов половодного стока в створе Средне-Енисейской ГЭС, притока к створам Иркутской и Красноярской ГЭС, а также стока с частных водосборов между вышерасположенными гидроузлами.

2) Отбирают модели трех самых многоводных лет — в данном случае 1937, 1941 и 1966 гг. Объем гидрографа половодья в створе Средне-Енисейской ГЭС принимают за 100 %, а распределение объемов составляющих производят исходя из естественного распределения стока, имеющего место в названные годы. Полученное при этом сочетание обеспеченностей объемов половодного

стока с разных участков водосбора приведено для примера в табл. 15.5. Обеспеченность максимальных расходов воды с соответствующих водосборов принимают равной обеспеченности объ-

Таблица 15.5

Распределение вероятностей превышения максимальных расходов и объемов половодного стока в Ангаро-Енисейском каскаде, %

| ГЭС или участок | 1937 г. | 1941 г. | 1966 г. |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Средне-Енисейская ГЭС | 0,01 с г. п. | 0,01 с г. п. | 0,01 с г. п. |
| Приток к Иркутской ГЭС | 1,7 | 3,0 | 10,5 |
| Иркутская ГЭС — Братская ГЭС | 0,4 | 0,2 | 0,6 |
| Братская ГЭС — Усть-Илимская ГЭС | 9,0 | 24,0 | 19,0 |
| Усть-Илимская ГЭС — Богучанская ГЭС | 2,4 | 0,2 | 40,0 |
| Богучанская ГЭС — устье | 0,85 | 0,06 | 1,6 |
| Красноярская ГЭС | 0,09 | 0,1 | 0,01 |
| Красноярская ГЭС — Средне-Енисейская ГЭС (без Ангары) | 0,45 | 7,8 | 0,1 |

ема стока половодья (паводка). Техника дальнейших расчетов простая. По моделям выбранных половодий рассчитывают и строят гидрографы половодья с частных водосборов и в створах Иркутской и Красноярской ГЭС расчетной обеспеченностью, соответствующей табл. 15.5. Затем трансформируют построенные гидрографы половодий в створах головных гидроузлов на Ангаре и Енисее. Суммируя гидрографы сбросных расходов в створе верхнего гидроузла с гидрографом боковой приточности, получают гидрограф притока к створу нижнего гидроузла. Трансформируя его, рассчитывают гидрограф к следующему в каскаде гидроузлу и т. д. Определив приток к створу Средне-Енисейской ГЭС по трем

Таблица 15.6

Результаты пропуска половодий через замыкающую каскад Средне-Енисейскую ГЭС

| Показатель | Вероятность превышения, % | |
|---|---------------------------|--------|
| | 0,01 с г. п. | 0,1 |
| Максимальный расход воды в естественных условиях, м ³ /с | 80 000 | 65 000 |
| Максимальный проектный приточный расход воды, м ³ /с | 55 500 | 42 000 |
| Максимальный сбросной расход воды, м ³ /с | 45 400 | 40 700 |
| Максимальная высота форсированного уровня верхнего бьефа над НПУ, м | 3,0 | 0,8 |
| Уменьшение максимальных расходов воды, м ³ /с: | | |
| проектного | 10 100 | 1 300 |
| естественного | 34 600 | 24 300 |

моделям, в качестве расчетной принимают ту, по которой определяется наибольший расход притока к замыкающему створу. Сводные результаты расчетов пропуска высоких половодий через проектируемый Средне-Енисейский гидроузел приведены в табл. 15.6.

15.4. Основные положения выбора противопаводочного (резервного) объема водохранилищ

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 (противопаводочный) объем для аккумуляции стока в паводки редкой повторяемости или наступающие в конце сезона, после заполнения основного объема водохранилища. Противопаводочный объем водохранилища используется исключительно для аккумуляции ливневых летних паводков, проходящих, как правило, когда водохранилище уже заполнено до НПУ, и срезки максимальных расходов воды в целях защиты от затопления нижерасположенных земель. Противопаводочный объем определяется объемом расчетного годового 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 противопаводочного (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 противопаводочного 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 км³ аккумулирующего объ-

ема водохранилища. На рис. 15.6 для примера показаны кривые изменения затрат по гидроузлу и получаемого эффекта на 1 км^3 резервного объема для одного из проектируемых Ленгидропроект дальневосточных водохранилищ. Оптимальное значение резервного (противопаводочного) объема соответствует точке пересечения приведенных кривых. Как видно из рисунка, оптимальный резервный объем для рассматриваемого водохранилища $2,9 \text{ км}^3$.

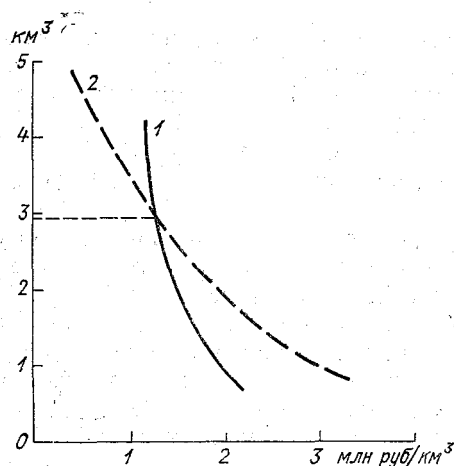


Рис. 15.6. Выбор противопаводочного объема водохранилища.

1 — затраты по гидроузлу, 2 — снижение ущерба в нижнем бьефе.

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.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие цели преследует регулирование стока высоких половодий и паводков?
2. Какими нормативными документами регламентируется выбор расчетной обеспеченности половодий и паводков?
3. Что такое статический и динамический объемы водохранилищ?
4. В чем состоит общая схема расчетов пропуска высоких половодий и паводков через гидроузлы?
5. В чем заключаются трудности расчетов трансформации половодий и паводков каскадно-расположенными водохранилищами?

6. Какова роль противопаводочного объема водохранилищ трансформации паводий и паводков и методы ее определения?

Глава 16

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

16.1. Расчет и построение кривых свободной поверхности на протяжении водохранилища

Расчет кривых свободной поверхности (кривых подпора) является задачей речной гидравлики. Кривые подпора характеризуют продольный профиль водной поверхности проектируемого водохранилища.

Рассмотрим один из методов расчета кривых свободной поверхности с использованием опорных кривых Н. М. Бернадского. Метод широко используется в практике водохозяйственного проектирования и требует минимальных затрат времени.

Исходная зависимость для расчета имеет следующий вид:

$$Q^2 = h^{4/3} F^2 \Delta / (Ln^2), \quad (16.1)$$

где h — средняя глубина воды на участке, $h = F/B$ или $h = W/\Omega$; (F — средняя на участке площадь живого сечения, B — средняя ширина, W — объем воды в русле реки в пределах участка, Ω — площадь зеркала воды в пределах участка); L — длина расчетного участка; n — коэффициент шероховатости по Маннингу; Δ — падение уровня воды на участке при расходе Q .

Очертание опорной кривой не зависит от подпора и остается постоянным в любых условиях подпора. Это свойство опорной кривой весьма удобно при переходе от естественного состояния реки к режиму, заданному условиями проектирования, а также в случаях расчисток русла или их сооружения.

Для расчета и построения опорных кривых Н. М. Бернадского, а в последующем кривых подпора река на протяжении исследуемого водохранилища разбивается на расчетные участки. Границы расчетных участков (расчетные створы) намечаются в местах гидрометрических створов и створов гидрологических постов, в местах перелома продольного профиля, местах впадения крупных притоков, а также сообразуясь с детальностью в освещении подпорных уровней.

В основе построения опорных кривых Н. М. Бернадского лежит «елочка» кривых зависимости расходов воды от уровней воды $Q = f(Z)$ в граничных створах участков.

Построение опорной кривой по «елочке» кривых $Q = f(Z)$ производится графическим подбором. Пусть имеем в порядке возраста-

ния расходы Q_1, Q_2, Q_3 и т. д. и соответствующие им уровни в нижнем створе участка Z_1, Z_2, Z_3 и т. д. и уровни в верхнем створе участка $Z_1+\Delta_1, Z_2+\Delta_2, Z_3+\Delta_3$ и т. д. В координатах Z и Q^2 (рис. 16.1) на уровне Z_1 на произвольном расстоянии от оси Z наносим точку a , от точки a вправо откладываем отрезок, численно равный Q_1^2 . Проведя ординату от правого конца этого отрезка до уровня $Z_1+\Delta_1$, найдем точку b . Через точки a и b проводим плавную кривую выпуклостью влево.

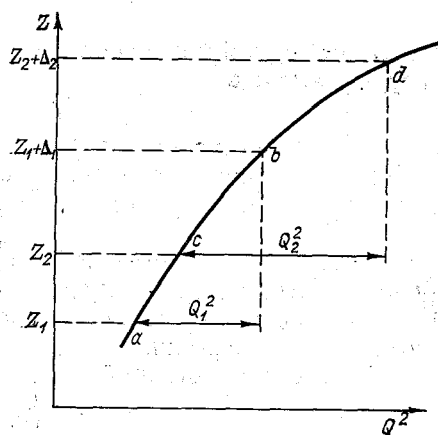


Рис. 16.1. Построение опорной кривой Н. М. Бернадского графическим подбором по гидрометрическим данным для одного участка.

Далее от этой кривой на уровне Z_2 из точки c откладываем вправо отрезок, численно равный Q_2^2 . Проведя ординату от правого конца этого отрезка до уровня $Z_2+\Delta_2$, найдем точку d и через точки a, b, c, d проведем плавную кривую. Если плавной кривой не получается, то точки c и d сдвигаются на одно и то же расстояние вправо или влево таким образом, чтобы получилась плавная кривая $abcd$, являющаяся частью опорной кривой. Аналогичным путем опорная кривая строится для расходов Q_3, Q_4 и т. д.

Расчет опорных кривых удобно вести в табличной форме (табл. 16.1).

Расходы воды удобнее брать в порядке их возрастания.

Таблица 16.1

Расчет опорных кривых Н. М. Бернадского

| Участок | Расход воды Q м ³ /с | Q^2 , м ⁶ /с ² | Уровень воды в нижнем створе участка Z_n м | Уровень воды в верхнем створе участка Z_b м |
|---------|--------------------------------------|--|--|---|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Экстраполяция опорных кривых Н. М. Бернадского до проектных уровней, находящихся за пределами естественных (по $Q = f(Z)$), производится двумя способами.

1. По гидравлическим элементам русла и поймы. Экстраполяция опорных кривых этим способом производится путем реализации зависимости (16.1). Для этого с карт, как правило, М 1 : 25 000 или более крупных снимают поперечные профили русла и поймы в граничных створах расчетных участков. Путем их обработки строят кривые зависимости площадей живых сечений, ширины русла и поймы от уровней. Коэффициенты шероховатости русла (n_p) и поймы (n_n) принимают соответственно по значениям, вычисленным для наблюдаемого уровня или полученным путем экстраполяции кривых $n_p = f(Z_{cp})$ и $n_n = f(Z_{cp})$, где Z_{cp} — средний уровень на участке.

При этом

$$n_p = \frac{h_p^{2/3} F_p \sqrt{\Delta}}{Q_p \sqrt{L}}, \quad n_n = \frac{h_n^{2/3} F_n \sqrt{\Delta}}{Q_n \sqrt{L}}. \quad (16.2)$$

Здесь обозначения те же, что и в формуле (16.1), только отнесенные к руслу и пойме. В случае невозможности определения n_n последний принимают по таблице М. Ф. Срибного с учетом уменьшения его при больших глубинах на пойме.

Расчет и экстраполяция опорной кривой производится по формуле

$$Q^2 = Q_p^2 + Q_n^2 = \frac{h_p^{4/3} F_p^2 \Delta}{L n_p^2} + \frac{h_n^{4/3} F_n^2 \Delta}{L n_n^2}. \quad (16.3)$$

При экстраполяции опорных кривых Δ задается близким к естественным падениям уровней на участках в условиях прохождения максимальных расходов. С повышением уровня воды величина Δ уменьшается и в зоне явного подпора не зависит от уклона, т. е. выбирается произвольно.

2. При отсутствии топографических и гидравлических характеристик русла и поймы. Экстраполяция опорных кривых в этом случае производится приближенно по формуле степенной функции типа $x = ay^m$, которая реализуется методом подкасательных.

Сущность метода показана на рис. 16.2. AC — касательная, проведенная к точке A , $AB(x)$ — расстояние по горизонтали от точки A до оси y (y — расстояние от точки B до отметки донного порога, отвечающего нулевому расходу на участке), λ — так называемая подкасательная, отбиваемая на вертикальной оси y . Постоянные коэффициенты находят, исходя из треугольника ABC по соотношениям: $m = y/\lambda$, $a = x/y^m$. Задавая различные значения y и подставляя полученные значения a и m , находят соответствующие значения x и по ним строят опорную кривую за пределами естественных уровней.

Рис. 16.2. Экстраполяция опорной кривой Н. М. Бернадского методом подкасательных.

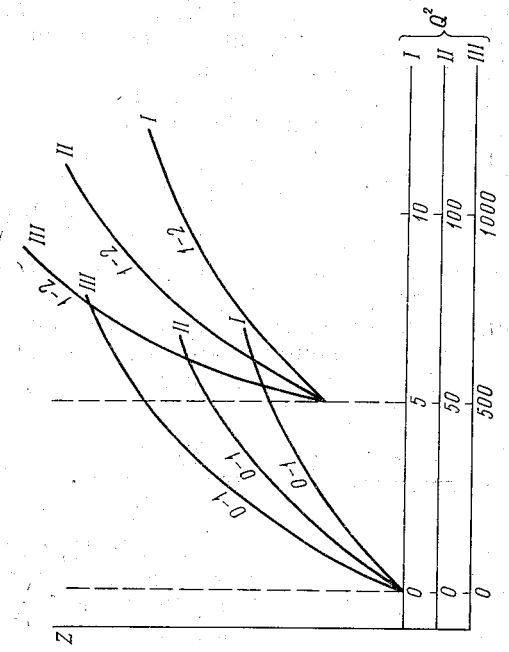
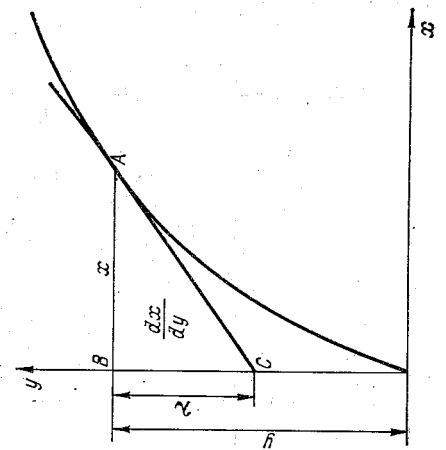


Рис. 16.3. Вид опорных кривых Н. М. Бернадского для разных участков.

Вид опорных кривых для разных расчетных участков с изменением масштаба расходов (Q^2) приведен на рис. 16.3.

По построенной системе опорных кривых на протяжении водохранилища можно быстро произвести расчет кривой подпора, зная уровень у плотины и расходы воды на каждом расчетном участке. При различных расходах на концах участка вместо Q^2 следует брать квадрат полусуммы этих расходов

$$[(Q_{x+L} + Q_x)/2]^2$$

или выражение

$$(Q_{x+L}^2 + Q_{x+L}Q_x + Q_x^2)/3,$$

где Q_x и Q_{x+L} — расходы на концах участка.

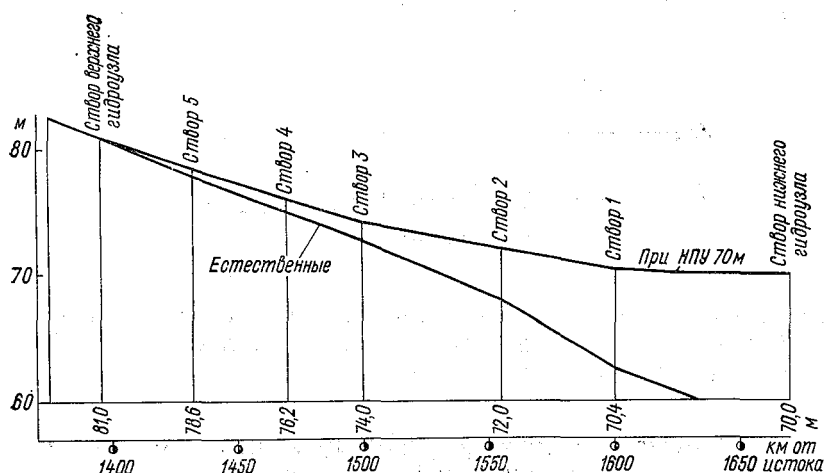


Рис. 16.4. Профиль водной поверхности реки на участке между створами гидроузлов в естественных условиях и при НПУ 70 м в половодье 1 %-ной обеспеченности.

По Z_0 и Q_0^2 по опорной кривой для участка 0—1 определяется Z_1 .

По опорной кривой 1—2 по Z_1 и Q_1^2 определяется Z_2 и т. д.

Для примера на рис. 16.4 приведен профиль водной поверхности водохранилища в половодье 1 %-ной обеспеченности.

Для определения уровней в нижнем бьефе верхнего гидроузла, находящегося в подпоре от нижнего гидроузла, а также для оценки степени затопления в контрольных створах при различных НПУ с помощью системы опорных кривых Н. М. Бернадского нетрудно рассчитать и построить «абаки» зависимости уровней в контрольных створах от различных НПУ и расходов воды. Вид такой «абаки» в створе 5 показан на рис. 16.5.

Кроме изложенного неклассического подхода к гидравлическим расчетам в практике проектных организаций распростра-

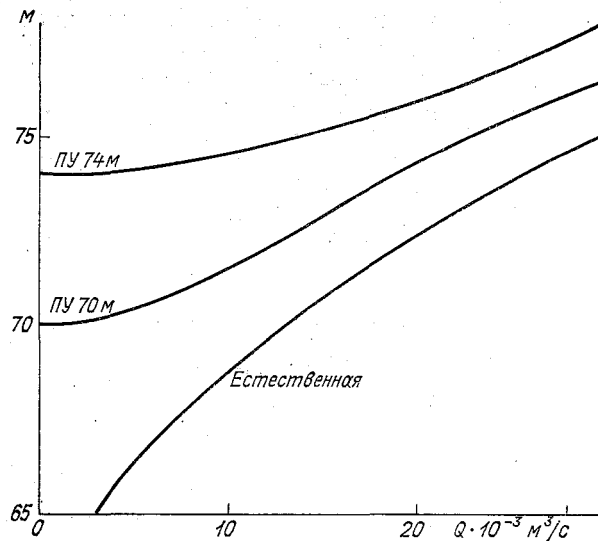


Рис. 16.5. Кривая («абака») зависимости уровней воды в створе 5 от расходов и уровней воды в створе нижнего гидроузла.

нены стандартные программы для ЭВМ по расчету кривых свободной поверхности как при установившемся, так и при неустановившемся движении воды.

16.2. Оценка влияния водохранилища на расходы (уровни) воды в нижнем бьефе гидроузла

При проектировании гидроузлов возникает необходимость оценки их влияния на изменение природных условий, в том числе водного режима в нижнем бьефе на значительном удалении от гидроузла.

Обычно необходимые сведения о зарегулированных расходах и уровнях на протяжении нижнего бьефа ГЭС получают путем численного решения на ЭВМ основных уравнений Сен-Венана. Эти расчеты весьма трудоемки и требуют подробной информации о русле и пойме, поэтому не всегда могут быть применены при проектировании. Упрощенные же методы расчета, исключающие необходимость морфометрических характеристик русла, при резко неустановившемся режиме течения могут привести к значительным погрешностям. Однако на значительной протяженности нижнего бьефа течение воды может рассматриваться как квазиустановившееся, для расчетов которого успешно применяются упрощенные методы, основанные на использовании линейных трансформационных функций. Применимость линейной функции в кон-

кретных условиях должна быть подтверждена расчетами трансформации естественных паводков с проверкой по гидрометрическим наблюдениям. Ниже приводится способ расчета трансформации зарегулированного стока в нижнем бьефе проектируемого гидроузла с помощью линейной трансформационной функции Калинина—Милюкова в форме, предложенной Р. А. Нежиховским и имеющей вид

$$Q_t = H_1 q_{t-1} + H_2 q_t + H_3 Q_{t-1}, \quad (16.4)$$

где Q_t и Q_{t-1} — средние расходы воды за текущие и предшествующие сутки в замыкающем створе расчетного участка реки; q_t и q_{t-1} — то же во входном створе участка; H_1, H_2, H_3 — коэффициенты, характеризующие регулируемую способность русла на расчетном участке реки, зависящие от эмпирически подбираемого времени добегания стока τ и расчетного шага времени Δt , равные:

$$H_1 = \frac{\tau}{\Delta t} [1 - \exp(-\Delta t/\tau)] - \exp(-\Delta t/\tau), \quad (16.5)$$

$$H_2 = 1 - \frac{\tau}{\Delta t} [1 - \exp(-\Delta t/\tau)],$$

$$H_3 = \exp(-\Delta t/\tau). \quad (16.6)$$

Время добегания τ , являющееся показателем степени руслового регулирования стока на расчетном участке нижнего бьефа, определяется по разности моментов прохождения пиков половодий и паводков в расчетных створах.

Достоверность результатов расчета предлагаемым методом зависит от точности определения времени добегания τ по данным наблюдений за естественным стоком.

Применение линейных трансформационных функций при расчете режима расходов и уровней в нижнем бьефе ГЭС позволяет учитывать боковую приточность, которая, как правило, недостаточно освещена наблюдениями, без ее непосредственного определения. При этом вместо Q и q необходимо трансформировать разности между соответственными естественными и проектными расходами. Введем следующие обозначения: δ — разность среднесуточных расходов воды в условиях естественного и проектного режимов через входной створ ($\delta = q_e - q_p$); Δ — та же разность расходов, но уже трансформированная в русле через замыкающий створ ($\Delta = Q_e - Q_p$).

Предварительно полученный ряд разностей

$$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{t-1}, \delta_t, \dots, \delta_n$$

трансформируется последовательно по формуле

$$\Delta_t = H_1 \delta_{t-1} + H_2 \delta_t + H_3 \Delta_{t-1}$$

при заданных значениях H_1, H_2, H_3 . Расчет трансформации разностей с помощью вышеприведенного уравнения выполняется так же, как расчет трансформации расходов, с тем лишь отличием,

что необходимо учитывать знаки разностей, поскольку δ и Δ могут быть как положительными, так и отрицательными.

Для получения в замыкающем створе ряда проектных расходов $Q_{п}=f(t)$ необходимо ряд вычисленных по вышеприведенной формуле разностей $\Delta=f(t)$ вычитать с учетом знаков Δ из соответствующих членов ряда естественных расходов в замыкающем створе $Q_{е}=f(t)$, включающих в себя и трансформированные в русле расходы боковой приточности.

Все расчеты выполняются на микроЭВМ или на ЭВМ. Приведенная схема расчетов позволяет рассчитать ежедневные проектные расходы в паводочный период, т. е. в период открытого русла, когда наиболее ярко сказывается влияние сезонного регулирования стока.

Для перехода от проектных расходов к уровням воды используются связи между уровнями и расходами воды $Q=f(Z)$, установленные для естественного режима стока.

Непрерывными условиями применимости способа трансформации разностей являются надежная увязка по длине реки данных о стоке в естественных условиях и независимость коэффициентов H_1 , H_2 и H_3 от степени наполнения русла. Опыт показал, что в пределах большого диапазона расходов воды могут применяться постоянные значения этих коэффициентов. Лишь при значительных выходах воды на пойму возникает необходимость изменения коэффициентов. Однако в проектных условиях вероятность выходов воды в нижнем бьефе на пойму существенно уменьшается, поэтому увеличивается возможность применения постоянных коэффициентов.

Для выполнения расчетов проектных расходов воды на протяжении нижнего бьефа необходимы следующие исходные данные: год — начальный год расчетного периода; m — количество трансформаций ($m=\tau/\Delta t$); H_1 , H_2 , H_3 — эмпирические коэффициенты, характеризующие регулируемую способность русла на расчетном участке реки; E — ежедневные естественные расходы воды в створе гидроузла за паводочный период; P — ежедневные проектные (зарегулированные) расходы воды в створе гидроузла за тот же период. Учитывая, что регулирование стока производится по декадным или месячным интервалам времени, среднесуточные зарегулированные расходы в створе гидроузла для периода заполнения полезного объема водохранилища принимают равными среднедекадным или среднемесячным, а после заполнения водохранилища их принимают равными среднесуточным расходам притока в водохранилище; A — ежедневные естественные расходы воды в замыкающем створе за тот же период.

Для расчета проектного режима расходов воды для следующего года подготавливаются исходные данные E , P , A для этого года и т. д. для ряда лет.

В целях проверки правильности полученных приведенным способом данных строятся совмещенные гидрографы естественных и зарегулированных расходов в расчетных створах на протяжении

нижнего бьефа. Для примера на рис. 16.6 даны такие гидрографы для условий маловодного года. Анализ их показывает, что с удалением от створа ГЭС влияние водохранилища на расходы воды

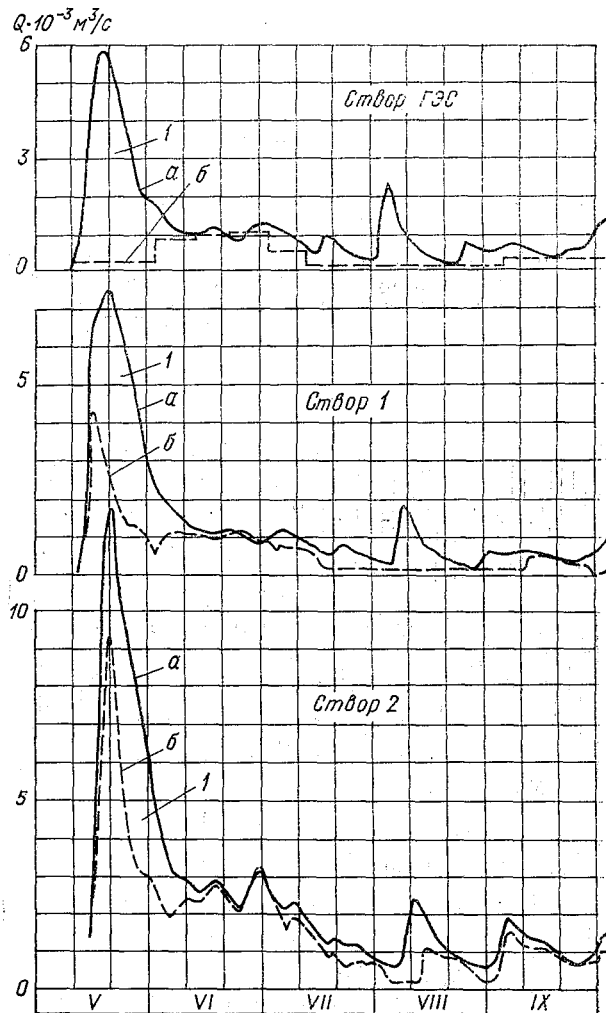


Рис. 16.6. Гидрографы естественных (а) и зарегулированных (б) расходов воды в расчетных створах на протяжении нижнего бьефа.

1 — площадь, заключенная между гидрографами а и б, численно равна объему аккумуляции воды в водохранилище в весенне-летний период.

в реке затухает. Степень возможных изменений естественных расходов (уровней) в нижнем бьефе ГЭС при регулировании стока оценивается по совмещенным на одном графике кривым обеспе-

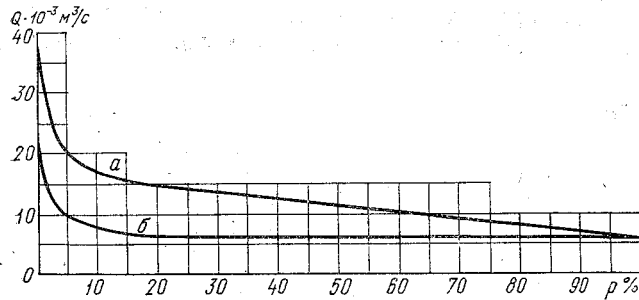


Рис. 16.7. Кривые обеспеченности (продолжительности превышения) среднесуточных расходов воды для естественного (а) и проектного (б) режимов за вторую декаду июня в створе 1 (590 км от ГЭС).

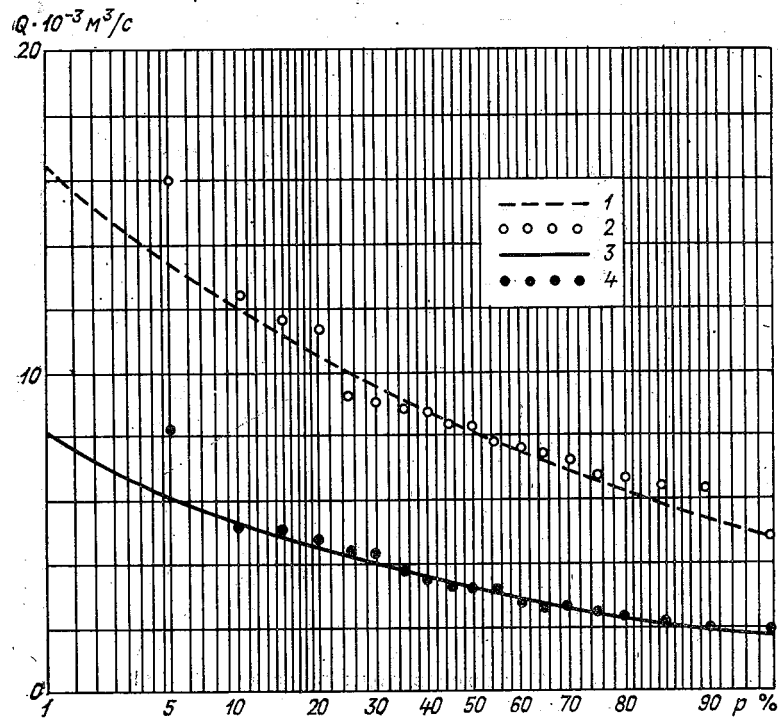


Рис. 16.8. Кривые обеспеченности максимальных расходов воды в створе 1 (590 км от ГЭС).

1 — аналитическая кривая естественных расходов воды, по параметрам приведенных к многолетию ($\bar{Q}_{\text{макс}} = 3460 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_v = 0,31$, $C_s/C_v = 3$); 2 — естественные расходы за период 1948—1966 гг.; 3 — кривая проектных расходов воды, приведенных к многолетию; 4 — проектные расходы за период 1948—1966 гг.

ченности (продолжительности превышения) естественных и проектных расходов воды в створах нижнего бьефа, которые рассчитываются по среднесуточным значениям расходов воды. На рис. 16.7 приведены такие кривые за вторую декаду июня в створе 1 (590 км от ГЭС) для одной из сибирских ГЭС.

Изменение максимальных годовых расходов воды характеризуется совмещенными кривыми обеспеченности максимальных расходов воды при естественном и зарегулированном стоке в контрольных створах, вид которых для того же створа приведен на рис. 16.8. Приведение проектных зарегулированных расходов к многолетию производится по параметрам многолетнего распределения максимальных естественных расходов с помощью модульного коэффициента $K_i = Q_i / Q_{\text{макс}}$, где Q_i — максимальные естественные расходы, определенные по короткому расчетному ряду; $Q_{\text{макс}}$ — средний из максимальных естественных расходов, приведенных к многолетию. По таблицам С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля снимаем обеспеченность (p) соответствующего K_i и сдвигаем точку i на соответствующее p в многолетнем разрезе. Вычитая ΔQ_i (естественный расход минус зарегулированный в точке i), получаем для этой обеспеченности максимальный зарегулированный расход. Через $Q = f(Z)$ переходим к максимальным уровням соответствующей обеспеченности. Огибающая эти максимальные естественные и проектные уровни различной обеспеченности в контрольных створах дает продольный профиль максимальных естественных и проектных уровней на протяжении нижнего бьефа.

16.3. 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 малозаметными. 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:

$$Q = Q(S, t), \quad Z = Z(S, t), \quad (16.7)$$

где S — расстояние от начального створа.

Система уравнений, описывающая неустановившееся медленно изменяющееся течение в неразмываемом 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 (конечноразностные) 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 лотманской 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 поверхности 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 $K/\Delta S=Q/\sqrt{Z_n-Z_k}$ (ΔS — длина участка; Z_n и Z_k — уровни воды в начале и конце участка при расходе Q_i , а $Z=(Z_n+Z_k)/2$). 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 рас-

Таблица 16.2

Результаты расчетов суточного регулирования мощности ГЭС
Летние сутки: среднесуточная мощность ГЭС 863 МВт,
среднесуточный расход ГЭС 880 м³/с

| N створа | Расстояние от ГЭС, км | Уровень воды, м | | | Расход воды, м³/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 |

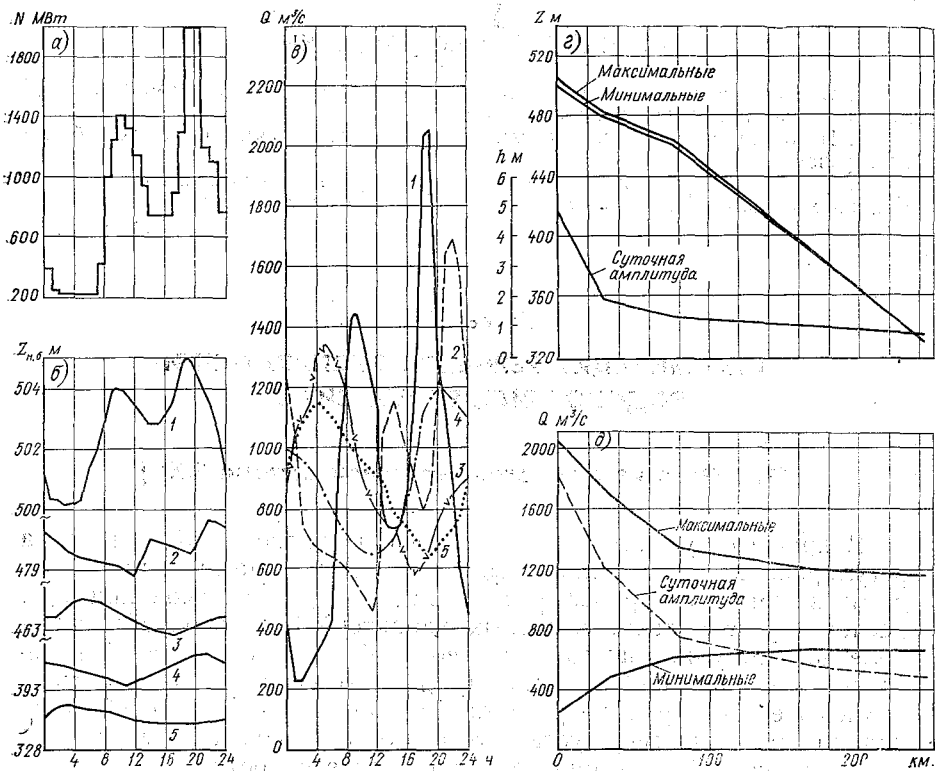


Рис. 16.9. Режим нижнего бьефа ГЭС при суточном регулировании ее мощности (положение створов 1—5 дано в табл. 16.2).

а — суточный график электрической нагрузки; б — уровни воды в нижнем бьефе гидроузла в характерных створах; в — расходы воды в тех же створах; г — профили экстремальных уровней воды в нижнем бьефе гидроузла; д — профили экстремальных расходов воды в нижнем бьефе гидроузла.

ходы воды по формуле

$$Q_i = N_i / [K_N (H_{\text{бpi}} - \Delta h)], \quad (16.8)$$

где N_i — мощность ГЭС в момент времени t_i ; $H_{\text{бpi}}$ — напор брутто на ГЭС в тот же момент, определяемый как разность уровней верхнего и нижнего бьефов (вычисляется в процессе расчета); Δh — 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. 16.2 и на рис. 16.9 приведены результаты расчетов применительно к одной из сибирских ГЭС. Они соответствуют минимальным летним суткам.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. С какой целью производится расчет и построение кривых свободной поверхности на протяжении водохранилищ?
2. Назовите способы оценки изменения водного режима в нижнем бьефе гидроузлов.
3. Как, в общих чертах, проводятся расчеты неустановившегося режима в нижних бьефах ГЭС при суточном регулировании их мощности?

Глава 17

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ

17.1. Понятие о водохозяйственной системе (ВХС)

В предшествующих разделах курса изучались методы расчета регулирования стока одиночными водохранилищами и их каскадами, в том числе трансформации паводков, и на основании этих расчетов установление основных характеристик водохранилищ — полезного регулирующего и мертвого объемов, многолетней и сезонной составляющей объемов (и др.). В этом случае использовались жесткие правила расчета тех или иных показателей водохранилища. Например, установление объема водохранилища при заданном потреблении определенной обеспеченности.

Проблемы водообеспечения современной экономики, использование водных ресурсов для мелиорации земель, транспорта, гидроэнергетики и других целей требуют создания систем водоемов и связанных с ними объектов — каналов, ГЭС, водозаборов, оросительных массивов и т. д.

В настоящее время в России построены, эксплуатируются и продолжают развиваться крупнейшие в мире водохозяйственные системы, которые имеют и будут иметь большое значение для отраслей хозяйства. Среди них первое место занимает Волжско-Камский каскад гидроузлов, созданный для использования гидроэнергетического потенциала Волги и Камы. Он совместно с Волго-Балтийским и Волго-Донским водными путями образовал уникальную глубоководную транспортную систему, соединившую Балтийское, Белое, Каспийское, Азовское и Черное моря. В результате создания этой системы решены проблемы водообеспечения промышленности, теплоэнергетики, сельского хозяйства, водоснабжения городов, а также задачи отдыха населения. Такие же задачи решаются водохозяйственной системой Днепра, позволившей, кроме всего прочего, подать воду в Северный Крым. Развивается Ангаро-Енисейская водохозяйственная система. В Средней Азии и Казахстане создан ряд оросительно-энергетических систем — в бассейнах рек Сырдарья и Амударья.

Современное водное хозяйство, построенное на принципе комплексного использования водных ресурсов, представляет собой совокупность водохозяйственных систем различных масштабов. В этом смысле к водохозяйственным системам можно отнести любую систему, включающую в себя источник воды, ее потребителей и учитывающую факторы водопотребления или водопользования, являющийся эффективным методом изучения водохозяйственных систем.

Системный анализ любую систему определяет как совокупность элементов, объединенных взаимными связями в единое целое, функционирующую как единое целое. Специалисты водного хозяйства понимают под водохозяйственной системой (ВХС) совокупность водопотребителей и водопользователей, связанных общим источником воды и использующих водные ресурсы в интересах различных отраслей народного хозяйства и охраны окружающей среды. В число элементов водохозяйственной системы могут входить естественные компоненты — водотоки, озера, грунтовые воды, а также искусственные — водохозяйственные установки, водохранилища, каналы, гидроэлектростанции, насосные станции и т. п. Водохозяйственные системы имеют связи с внешней средой — с другими речными бассейнами или воздействиями.

Водохозяйственные системы содержат искусственные компоненты, предназначенные для хозяйственного целевого использования, поэтому они называются *целевыми*. В соответствии с их назначением ВХС могут быть гидромелиоративными, гидроэнергетическими и навигационными, предназначаются для водоснабжения, разведения рыбы, отдыха населения и др.

Различают также *одноцелевые* и *многоцелевые* системы. Первые состоят из компонентов, функции которых подчинены достижению одной цели, например комплекс сооружений и мероприятий для защиты некоторой территории от наводнений. С самого начала проектирования такой системы ей задается цель в виде до-

стижения определенных технических параметров: обычно это — непревышение заранее установленного расхода воды в заданном числе случаев.

Многоцелевые водохозяйственные системы предназначены для достижения различных целей. Главная задача расчета этих систем — поиск такой комбинации компонентов системы и их свойств, которая оказалась бы оптимальной для многих целей. Многоцелевые ВХС относятся к категории сложных систем. Они имеют большое число компонентов и функциональных связей, причем изменение одного компонента, например гидрологических условий, приводит к изменению целого ряда связанных с ним других компонентов (водных ресурсов и водопотребления). Процессы, происходящие в сложных ВХС, можно отнести к категории случайных, равно как и входные гидрологические данные (расход, потребление и качество воды заранее установить практически невозможно), поэтому основные показатели системы имеют случайный характер. Требования к функциям многоцелевых ВХС часто являются противоположными. Например, требование увеличить объем водохранилища лимитируется размерами площади затопления, повышение глубин для одних целей вызывает сокращение потребления воды для других. Наконец, ВХС являются существенной частью среды обитания людей, поэтому для оценки эффективности системы необходимо наряду с экономическими показателями учитывать и экологические.

Однако на практике часто наблюдается такая ситуация, при которой отдельные цели являются взаимоисключающими. В этих случаях нахождение оптимального решения может быть упрощено, если одну из целей (например, снабжение водой) выбрать в качестве основной. Тогда многоцелевую систему исследуют как одноцелевую, а все неучтенные цели рассматривают в качестве лимитирующих условий.

17.2. Построение математических моделей ВХС

Для изучения водохозяйственных систем целесообразно использовать метод системного анализа, который можно охарактеризовать, как метод комплексного исследования явлений в их внутренней и внешней взаимосвязи. В арсенале системного анализа содержится целый ряд способов исследования систем и решения практических задач. К ним относятся распространившиеся в последнее время методы оптимального программирования, которые нашли широкое применение при решении проблем управления и планирования производственных процессов, в проектировании и военном деле, т. е. в тех областях человеческой деятельности, где необходим выбор одного из возможных вариантов программы действий (отсюда название — программирование). Системный анализ отдает предпочтение количественным методам, одним из которых является метод математического моделирования. При этом мате-

математическая модель ВХС призвана только в общих чертах отразить реальные системы, наиболее существенные их свойства и цели. Пути достижения поставленных целей реальной ВХС изучают посредством анализа этих целей на модели системы. Поэтому правильная разработка математической модели системы — главное условие успешного решения поставленной задачи.

Модель ВХС должна содержать математические выражения для вычисления экономических и других оценок водохозяйственного проекта, называемых *целевыми функциями*. В зависимости от назначения проекта математическая модель, описывающая ВХС, должна содержать переменные управляющие параметры, которые будут изменяться в процессе анализа модели и выбора их оптимальных значений. Этими параметрами могут быть, например, объемы водохранилищ и размеры дамб для системы защиты от наводнений, объемы водохранилищ, площади орошения и пропускные способности каналов и водоводов для системы мелиораций и др. Каждый вариант набора значений этих параметров называется *планом*. С помощью моделей ВХС исследуются различные планы принимаемых решений с оценкой эффективности достижения целей, поставленных перед ВХС.

Главной целью использования водных ресурсов является экономическая эффективность, ее оценка ведется с помощью сопоставления доходов и затрат (капитальных, эксплуатационных и др.). Экономические цели ВХС описываются математическим уравнением, увязывающим чистый доход с планом и называемым *целевой функцией*. В качестве примера запишем следующее уравнение целевой функции для ВХС, связанной с использованием зарегулированного стока:

$$F(Q_{\text{вп}}, V) = \mathcal{E}(Q_{\text{вп}}) - P(V) - R(V) - R(Q_{\text{вп}}, V). \quad (17.1)$$

Здесь $F(Q_{\text{вп}}, V)$ — целевая функция, зависящая от плана — управляющих параметров модели; $Q_{\text{вп}}$ — расход водопотребления; V — емкость водохранилища; $\mathcal{E}(Q_{\text{вп}})$ — суммарные доходы отраслей, использующих воду из водохранилища; $P(V)$ — затраты на создание емкости V ; $R(Q_{\text{вп}}, V)$ — возможный ущерб от недодачи гарантированного расхода в перебойные периоды, зависящий также от имеющегося запаса воды.

Понятно, целевая функция может иметь различную форму записи в зависимости от назначения ВХС и состава компонентов. Все составляющие целевой функции имеют одинаковую размерность и выражаются в денежных единицах, в объемах полезной водоотдачи или выпускаемой продукции, показателях качества воды и т. д.

Целевая функция (17.1) выражает одну цель — экономическую эффективность. Вспомогательные цели учитываются математической моделью посредством введения в нее ограничений, которые одновременно выражают взаимосвязь между отдельными компонентами ВХС. Ограничения могут быть двух типов. К первому типу относят физические ограничения, которые не могут быть на-

рушены. К ним относятся ограничения, связанные с требованиями выполнения водного баланса системы, ограничения технического свойства — на размеры водохранилищ, труб, генераторов и насосов. Ко второму типу ограничений относят требования к проекту, например к размеру санитарного попуска из водохранилища или режиму подачи воды потребителям. Сюда же относятся финансовые (ограничение фондов финансирования), юридические (законодательно установленные показатели качества воды) ограничения, допустимые значения параметров модели. С математической точки зрения эти ограничения представляются в виде неравенств или уравнений. К ограничениям добавляются условия неотрицательности параметров модели.

Обычно для большинства задач развития ВХС может быть представлено множество вариантов планов. Любой из них, удовлетворяющий всем ограничениям, называется *допустимым планом*. Поскольку главной задачей создания ВХС является достижение наибольшей экономической эффективности, ищут такой вариант набора параметров, или план, который максимизирует целевую функцию при одновременном удовлетворении всех ограничений модели ВХС. Такой план называется *оптимальным планом*. Следует отметить, что в некоторых случаях поставленная цель и ее функция требуют поиска минимума, если она определяет стоимость издержек или ущерба, например от наводнений. В этом случае оптимальный план ищут из условия достижения минимума целевой функции.

Запишем в общем виде задачу отыскания оптимального плана, изложенную выше. Обозначим через x набор из n параметров ВХС

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n. \quad (17.2)$$

Целевую функцию запишем в виде

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (17.3)$$

а ограничения представим функцией

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (17.4)$$

и дополним условием неотрицательности параметров

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (17.5)$$

В этих выражениях функции F и g_i известны, а b_i — заданные постоянные; n — число параметров модели; m — число ограничений.

Решением задачи оптимального программирования является такой оптимальный план (набор значений параметров)

$$x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0, \quad (17.6)$$

который удовлетворяет ограничениям задачи (17.4) и (17.5) и максимизирует целевую функцию (17.3):

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \max. \quad (17.7)$$

рианта плана, который оптимизирует целевую функцию. В теории линейного программирования сформулированная выше задача носит название *основной задачи линейного программирования*. Для простейших случаев ее решение можно проиллюстрировать при помощи следующего примера. Представим систему, управляемую двумя параметрами x_1 и x_2 . Допустим нам известны числовые зна-

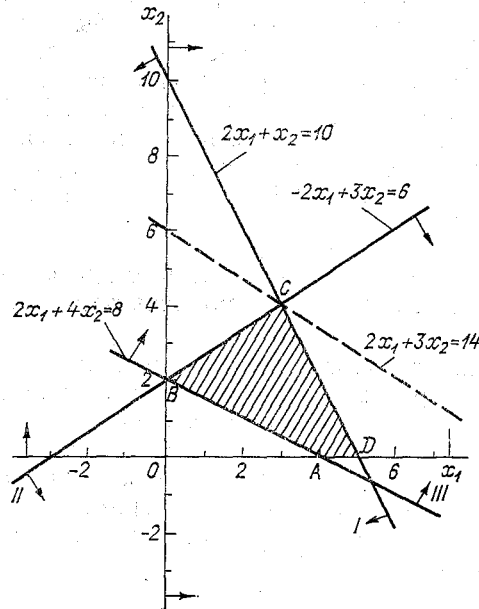


Рис. 17.1. Графическое решение задачи линейного программирования.

чения коэффициентов a , b , c уравнений (17.10), (17.11) и (17.12), ограничения представлены неравенствами:

$$\left. \begin{aligned} 2x_1 + x_2 &\leq 10 \\ -2x_1 + 3x_2 &\leq 6 \\ 2x_1 + 4x_2 &\leq 8 \end{aligned} \right\}, \quad (17.13)$$

$$x_1, x_2 \geq 0, \quad (17.14)$$

а целевая функция уравнением

$$F = 2x_1 + 3x_2. \quad (17.15)$$

Значения параметров x_1 и x_2 необходимо определить так, чтобы они удовлетворяли условиям (17.13) и обращали в максимум целевую функцию (17.15). Решение этой задачи иллюстрирует график на рис. 17.1. Здесь показаны три линии, разделяющие каждая всю координатную плоскость графика на две части, одна из частей (полуплоскость), куда показывают стрелки у линий, содержит точки с координатами, удовлетворяющими одному из

неравенств системы (17.13). Линия раздела полуплоскостей строится по одному из условий (17.13) с учетом только знака равенства.

Как видно из этого рисунка, всем трем неравенствам (17.13) одновременно удовлетворяют точки внутри четырехугольника $ABCD$. Именно из этой области могут быть найдены искомые параметры x_1^0 и x_2^0 , поэтому область $ABCD$ называется *областью допустимых решений*. Заметим, что возможных решений здесь может быть бесконечное множество, так как любая пара значений свободных переменных из области допустимых решений удовлетворяет ограничениям. Однако в качестве оптимального решения следует выбрать координаты той точки области, в которой целевая функция принимает максимальное значение. Очевидно, это точка C , через которую проведена линия целевой функции. Именно координаты этой точки x_1^0 , x_2^0 являются оптимальным решением задачи, удовлетворяя всем условиям математической модели.

Рассмотрим пример построения линейной модели для простой водохозяйственной системы при разделении года на многоводный и маловодный периоды. Схема этой системы приведена на рис. 17.2. В систему входят два водохранилища с полезными объемами V_1 и V_2 , орошаемый массив с годовым потреблением воды V_Z и гидроэлектростанция с годовой выработкой электроэнергии E_V . Исходными гидрологическими данными для модели являются объемы речного стока в различных створах речной системы для двух периодов года — многоводного и маловодного. На схеме объемы представлены в тысячах кубических километров стока или потребления воды за период, причем данные многоводного периода на рис. 17.2 записаны выше черты, а маловодного — ниже. По требованиям производства в маловодный период для орошения подается воды 60 %, а в многоводный 40 % годового объема водозабора V_Z . В качестве возвратных вод из орошаемого массива в реку вернется 30 % от V_Z в маловодный период и 10 % в многоводный. Выработка электроэнергии сохраняется одинаковой в течение года, т. е. по 50 % от E_V для каждого периода.

Требуется определить полезные объемы воды в обоих водохранилищах, а также количества воды, необходимые для орошения массива земель и производства электроэнергии с целью получить максимально возможный экономический эффект от эксплуатации данной ВХС. Таким образом, в качестве параметров принятия решений здесь выступают четыре переменные V_1 , V_2 , V_Z и E_V , оптимальные значения которых (оптимальный план) являются решением поставленной задачи.

Составляемая математическая модель ВХС должна содержать следующие ограничения. Первая группа ограничений определяет условия неотрицательности искомых параметров, т. е.

$$V_1 \geq 0; V_2 \geq 0; V_Z \geq 0 \text{ и } E_V \geq 0, \quad (17.16)$$

что по смыслу этих переменных очевидно.

Вторая группа ограничений учитывает требования к расходам воды в определенных створах речной сети, где водозабор из реки не должен превышать расходы воды в реке. Эти ограничения за-

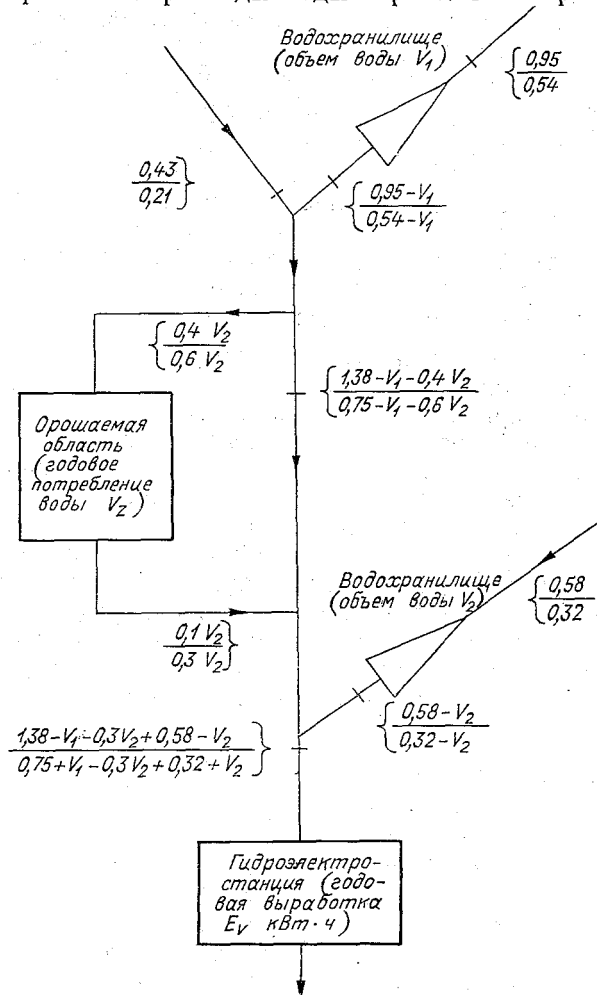


Рис. 17.2. Линейная модель водохозяйственной системы.

писываются в форме следующих неравенств, записанных, причем только к створам после водозаборов и водохранилищ, для мало-водного и многоводного периодов:

$$\left. \begin{aligned} 0,95 - V_1 &\geq 0 \\ 1,38 - V_1 - 0,4V_z &\geq 0 \\ 0,75 + V_1 - 0,6V_z &\geq 0 \\ 0,58 - V_2 &\geq 0 \end{aligned} \right\} (17.17)$$

Записанные ограничения выражают различные требования, например, на полезный объем первого водохранилища V_1 , который не может превысить объем притока за многоводный период 0,95, в противном случае в нижнем бьефе будет отсутствовать сток в русле. Это условие учитывается неравенством $0,95 - V_1 \geq 0$. Аналогичное требование учтено и для створов после водозабора на орошение и после второго водохранилища. В модель вводятся также ограничения на приток воды к гидроэлектростанции для выработки одинакового в обоих периодах года гарантированного количества электроэнергии. Они имеют форму следующих неравенств:

$$\left. \begin{aligned} 1,38 - V_1 - 0,3V_z + 0,58 - V_2 &\geq 0,5K_E E_V \\ 0,75 + V_1 - 0,3V_z + 0,32 + V_2 &\geq 0,5K_E E_V \end{aligned} \right\} \quad (17.18)$$

Здесь K_E — коэффициенты перевода объемов проходящей через турбины воды в количество вырабатываемой электроэнергии, а коэффициент 0,5 означает долю годовой выработки электроэнергии в каждый период.

Наконец, математическая модель завершается формированием целевой функции, выражающей суммарную чистую прибыль, получаемую от эксплуатации водохозяйственной системы в целом:

$$F = \mathcal{E}(E) + \mathcal{E}(V_z) - P(V_1) - P(V_2) - P(V_z) - P(E), \quad (17.19)$$

где F — целевая функция; $\mathcal{E}(E)$ — суммарная прибыль, получаемая за снабжение электроэнергией, а $\mathcal{E}(V_z)$ — за обеспечение водой орошаемых площадей; $P(V_1)$, $P(V_2)$ — эксплуатационные затраты и капвложения на сооружение первого и второго водохранилищ с объемами воды V_1 и V_2 соответственно; $P(V_z)$ — те же виды затрат для создания системы орошения с объемом подаваемой воды V_z , а $P(E_V)$ — для выработки годового количества электроэнергии E_V . Следует отметить, что уравнение (17.16) для целевой функции часто имеет нелинейную форму. В этом случае нелинейные функции заменяются ломаной линией или линеаризуются в области оптимального решения одним из известных в математике способов.

Таким образом, описанная выше математическая модель для примера простейшей водохозяйственной системы включает в себя ограничения (17.16), (17.17) и (17.18), а также целевую функцию (17.19). Все они содержат искомые параметры системы V_1 , V_2 , V_z и E_V . Оптимальные значения этих параметров (оптимальный план) должны быть вычислены для случая максимума целевой функции и при соблюдении всех приведенных ограничений математической модели ВХС. Составляющие математическую модель уравнения и неравенства имеют различную форму и включают в себя разное число параметров, однако все они путем введения нулевых коэффициентов могут быть приведены к виду формализованной системы (17.10) и (17.12). Их решения выполняются методами линейной алгебры и могут быть осуществлены на ЭВМ

благодаря стандартным вычислительным программам, подготовленным к использованию. В этом состоит еще одно преимущество метода линейного программирования по сравнению с другими оптимизационными методами.

В заключение отметим, что задача линейного программирования не имеет решения, если система ограничительных уравнений не формирует замкнутую область допустимых решений.

17.4. Расчет нелинейных моделей ВХС с использованием метода множителей Лагранжа

При анализе водохозяйственных систем может возникнуть проблема, состоящая в том, что целевые функции и ограничительные неравенства оказываются нелинейными. В этом случае необходимо искать решения методами нелинейного программирования.

Общая постановка задачи нелинейного программирования для моделей водохозяйственных систем формулируется аналогично изложенному выше — поиск оптимального плана (параметров ВХС), удовлетворяющего ограничениям произвольного вида и обращающего в максимум (минимум) нелинейную целевую функцию. Идея метода коэффициентов Лагранжа заключается в преобразовании целевой функции путем присоединения к ней уравнений ограничений, умноженных на множители, значения которых требуется определить. В результате получают следующую функцию Лагранжа:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i [b_i - g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)], \quad (17.20)$$

где L — функция Лагранжа; F — целевая функция; λ_i — коэффициенты Лагранжа; b_i и g_i — члены уравнения ограничения типа (17.4). Остальные обозначения определены ранее.

Важнейшим свойством функции Лагранжа является то, что ее экстремум имеет место при тех же значениях параметров x_1, x_2, \dots, x_n , при которых экстремальна целевая функция.

Решением задачи являются координаты экстремума функции Лагранжа, которые находят из системы уравнений для частных производных функции Лагранжа по x_1, x_2, \dots, x_n и λ , приравненных нулю.

Для иллюстрации применения метода коэффициентов Лагранжа при расчете параметров водохозяйственных систем рассмотрим пример оптимального распределения некоторого расхода воды Q между тремя водопотребителями с целью достичь максимального суммарного дохода всех участников системы. Составим уравнение целевой функции для каждого потребителя воды, принимая, что чистый доход любого из них увеличивается с ростом

выделяемого ему расхода по экспоненте

$$R_j = a_j [1 - \exp(-b_j x_j)], \quad (17.21)$$

где R_j — чистый доход j -го потребителя воды, выраженный в денежных единицах или в объемах произведенной продукции; a_j и b_j — известные коэффициенты целевой функции доходов для j -го потребителя, а x_j — выделяемый ему расход воды.

Суть задачи заключается в необходимости такого распределения имеющегося расхода воды Q между тремя потребителями x_1 , x_2 и x_3 , при котором достигается максимум суммарной целевой функции

$$F(x) = \sum_{j=1}^3 a_j [1 - \exp(-b_j x_j)] \rightarrow \max \quad (17.22)$$

с учетом ограничений на имеющийся расход

$$\sum_{j=1}^3 x_j = Q \quad (17.23)$$

и его неотрицательность

$$x_j \geq 0 \quad \text{при } j = 1, 2, 3. \quad (17.24)$$

Для получения функции Лагранжа перенесем в уравнении (17.23) $\sum x_j$ в правую часть уравнения и умножим его на некоторый коэффициент Лагранжа λ , получим

$$\lambda \left(Q - \sum_{j=1}^3 x_j \right) = 0. \quad (17.25)$$

Здесь принимается одно значение λ , поскольку имеется одно ограничительное уравнение. Соединив целевую функцию (17.22) и ограничение (17.25), получим функцию Лагранжа для решаемой задачи:

$$L(x, \lambda) = \sum_{j=1}^3 a_j [1 - \exp(-b_j x_j)] - \lambda \left(Q - \sum_{j=1}^3 x_j \right). \quad (17.26)$$

Для нахождения экстремума функции Лагранжа $L(x, \lambda)$ возьмем частную производную по каждой из переменных и приравняем ее нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_1} &= a_1 b_1 \exp(-b_1 x_1) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial x_2} &= a_2 b_2 \exp(-b_2 x_2) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial x_3} &= a_3 b_3 \exp(-b_3 x_3) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} &= x_1 + x_2 + x_3 - Q = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17.27)$$

Совместное решение системы первых трех уравнений дает выражение для вектора

$$x_j = \frac{1}{b_j} \left[-\ln \left(\frac{\lambda}{a_j b_j} \right) \right], \quad (17.28)$$

а с учетом последнего уравнения системы (17.27) получаем выражение

$$Q = \sum_{j=1}^3 \frac{-\ln [\lambda / (a_j b_j)]}{b_j}, \quad (17.29)$$

которое можно переписать относительно $\ln \lambda$

$$\ln \lambda = \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\ln (a_j b_j)}{b_j} - Q \right] / \sum_{j=1}^3 (1/b_j). \quad (17.30)$$

Последнее уравнение можно использовать для определения λ , а затем по уравнению (17.28) можно вычислить расходы x_1 , x_2 и x_3 , распределенные так между потребителями, что их суммарный доход окажется наибольшим, а общий водозабор не превысит заданного расхода Q .

Рассмотрим численный пример распределения расхода воды между тремя водопотребителями. Допустим, разрешено использовать общий расход $6 \text{ м}^3/\text{с}$. Пусть коэффициенты целевой функции имеют такие значения: $a_1=152,5$, $a_2=127,1$, $a_3=50,83$, а коэффициенты b_j одинаковы — $b_1=b_2=b_3=0,5$.

Подставляя эти значения коэффициентов в формулу (17.30), вычисляем $\ln \lambda=2,907$, что дает $\lambda=18,3$. С учетом известного λ по (17.28) устанавливаем доли расходов воды на каждого потребителя: $x_1=2,85 \text{ м}^3/\text{с}$; $x_2=2,49 \text{ м}^3/\text{с}$; $x_3=0,66 \text{ м}^3/\text{с}$, что в сумме составляет расход $6 \text{ м}^3/\text{с}$.

Представляет интерес расчет доходов каждого потребителя по формуле (17.21): $R_1=115,89 \text{ ед.}$, $R_2=90,48 \text{ ед.}$, $R_3=14,23 \text{ ед.}$, что в сумме дает оптимальный (максимальный) суммарный доход $220,6$. Нетрудно рассчитать суммарный доход при любом другом распределении воды, например при равном ее разделе по $2 \text{ м}^3/\text{с}$ каждому потребителю. В этом случае получается $R_1=96,39 \text{ ед.}$, $R_2=80,32 \text{ ед.}$, $R_3=32,13 \text{ ед.}$ В сумме это дает общий доход $208,84 \text{ ед.}$, что меньше оптимального, установленного расчетом по методу коэффициентов Лагранжа.

17.5. Метод динамического программирования

Основным недостатком линейного программирования является встречающаяся в ряде случаев плохая обусловленность линейных систем и зависимость результатов от ошибок в исходных данных. При использовании метода коэффициентов Лагранжа в случае большого числа компонентов водохозяйственной системы часто возникают затруднения в связи с отсутствием выраженного экстремума в области возможных значений параметров

модели. Во всех этих случаях задача успешно может быть решена при помощи метода динамического программирования.

Динамическое программирование — эффективный математический метод оптимального программирования, который не требует линейных функций целевой и ограничительных и даже не требует их аналитического описания. Он применяется при решении сложных водохозяйственных задач, когда целевая функция получается настолько сложной, что определить ее минимум (максимум) путем обычных способов не представляется возможным.

В практике водного хозяйства выделяются три основные задачи, где целесообразно применение динамического программирования: распределение воды, развитие водохозяйственных систем и управление водохранилищем.

Рассмотрим применение динамического программирования на примере задачи оптимального распределения воды между тремя потребителями. Схема вододелиния приведена на рис. 17.3. На этой схеме показан участок русла реки с входным расходом Q . Справа от русла стрелками показаны водоотводы с указанием отводи-

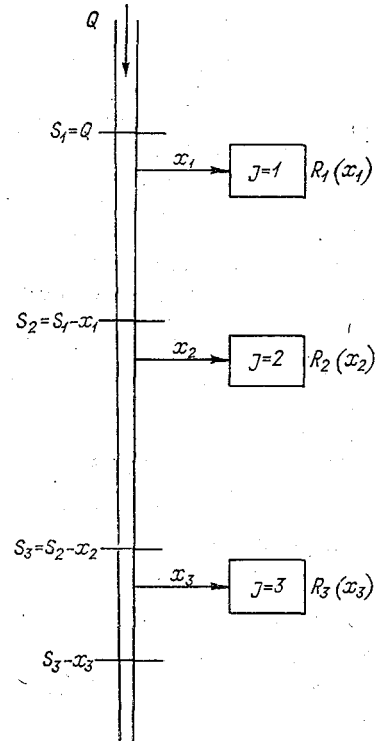


Рис. 17.3. Схема последовательного разделения воды трем потребителям.

S_1 — располагаемое количество воды; x — водоподача потребителю; R — чистый доход каждого потребителя.

мого расхода x_j , номера потребителя j и получаемого им чистого дохода $R_j(x_j)$. Слева от русла у створов перед водоотводами записаны расходы воды в реке S_i , которыми может располагать очередной потребитель.

Динамическое программирование позволяет решать задачу путем разложения ее на относительно небольшие и, следовательно, менее сложные подзадачи, которые последовательно решаются на каждом шаге процедуры принятия решений. При этом подача воды каждому потребителю рассматривается как стадия или шаг в последовательности решения задачи.

Предположим в рассматриваемом примере, что цель — достичь максимального чистого дохода в суммарном исчислении для всех потребителей описывается целевой функцией

$$\sum_{j=1}^3 \{a_j [1 - \exp(-b_j x_j)] - c_j x_j^{d_j}\} \rightarrow \max \quad (17.31)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^3 x_j \leq Q \quad (17.32)$$

и с учетом условий неотрицательности потребления

$$x_j \geq 0 \quad \text{при } j=1, 2, 3. \quad (17.33)$$

Здесь чистый доход каждого водопользователя отвечает выражению в прямых скобках формулы (17.31). Первое слагаемое под суммой в целевой функции означает стоимость получаемой валовой продукции j -го потребителя, а последний член с известными коэффициентами c_j и d_j определяет удельные затраты водопользователя. Обычно $d_j < 1$, т. е. функция затрат вогнутая, что означает уменьшение прироста затрат при увеличении водозабора. Достижение цели максимального чистого дохода можно записать в другой форме, а именно:

$$f_1(Q) = \max [R_1(x_1) + R_2(x_2) + R_3(x_3)]. \quad (17.34)$$

Однако эту задачу можно трансформировать в три задачи, каждая из которых содержит только одну переменную на данном этапе, т. е. для одного водопользователя. С этой целью уравнение (17.34) записывается так:

$$f_1(Q) = \max \{R_1(x_1) + \max [R_2(x_2) + \max R_3(x_3)]\} \quad (17.35)$$

при условии

$$0 \leq x_1 \leq Q; \quad 0 \leq x_2 \leq Q - x_1 = S_2; \quad 0 \leq x_3 \leq S_2 - x_2 = S_3.$$

Расчет начинается с поиска максимума целевой функции для третьего потребителя по данным различных значений расхода S_3 в интервале от 0 до Q , который может поступать к его водозабору:

$$f_3(S_3) = \max [R_3(x_3)], \quad (17.36)$$

при условии $0 \leq x_3 \leq S_3$.

Перепишем (17.33) с учетом функции дохода (17.36) и равенства $S_3 = S_2 - x_2$, а также при условии $0 \leq x_2 \leq S_2$, т. е.

$$f_1(Q) = \max \{R_1(x_1) + \max [R_2(x_2) + f_3(S_2 - x_2)]\}. \quad (17.37)$$

На следующем этапе имеем максимум целевой функции для второго и третьего водопользователя при подаче им воды S_2 . Для различных дискретных значений S_2 в интервале от 0 до Q находим максимум чистого дохода этих двух потребителей:

$$f_2(S_2) = \max [R_2(x_2) + f_3(S_2 - x_2)]. \quad (17.38)$$

Здесь $S_2 = Q - x_1$, поэтому выражение для f_1 (17.37) перепишем так:

$$f_1(Q) = \max [R_1(x_1) + f_2(Q - x_1)] \quad (17.39)$$

с учетом условия $0 \leq x \leq Q$.

Уравнение (17.39) дает решение для x_1 на последнем этапе при установленных оптимальных значениях x_2 и x_3 на предыдущих этапах. Как видно из шагов последовательных решений, на каждом следующем шаге расчет выполняется с учетом решений на предыдущих шагах. Это позволяет легко формализовать расчет по общему выражению:

$$f_j(S_j) = \max [R_j(x_j) + f_{j+1}(S_j - x_j)]. \quad (17.40)$$

Таким образом, основная идея метода динамического программирования — получение оптимального решения на последующем шаге решения, исходя из оптимального состояния на предыдущем шаге.

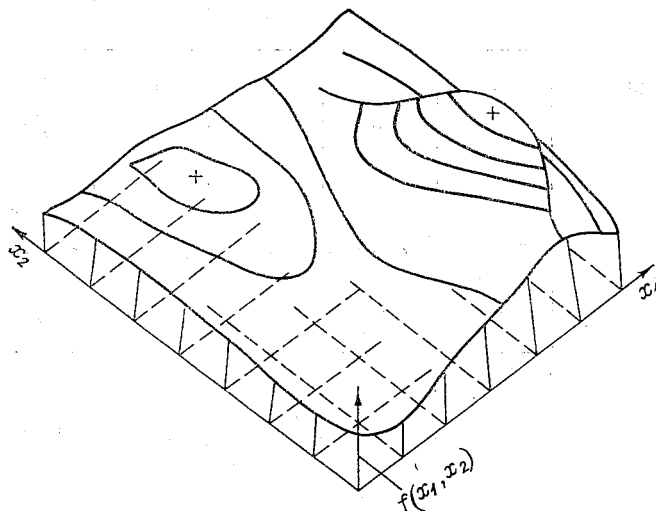


Рис. 17.4. Поверхность отклика имитационной модели.

Представление о методе динамического программирования можно получить на следующем числовом примере оптимального распределения воды между тремя водопользователями.

На рис. 17.4 показана схема, поясняющая задачу. Чистый доход каждого пользователя вычисляется по целевой функции

$$R_j(x_j) = a_j [1 - \exp(-b_j x_j)] - c_j x_j^{d_j}, \quad (17.41)$$

входящей составной частью в выражение общей целевой функции (17.31). Результаты расчета приведены в табл. 17.1, причем приняты такие значения параметров: $a=5$, $a_j=100, 50, 100$; $b_j=0,1; 0,4; 0,2$; $c_j=10, 10, 25$; $d_j=0,6, 0,8, 0,4$; для $j=1, 2, 3$ соответственно.

Вычисление дохода на каждом промежуточном шаге выполняется по (17.40). В результате этих расчетов получены значения:

Таблица 17.1

Чистый доход водопользователей

| x_j | $R_1(x_1)$ | $R_2(x_2)$ | $R_3(x_3)$ | x_j | $R_1(x_1)$ | $R_2(x_2)$ | $R_3(x_3)$ |
|-------|------------|------------|------------|-------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 6,6 | 10,9 | 6,3 |
| 1 | -0,5 | 6,5 | 6,9 | 4 | 10,0 | 9,6 | 11,5 |
| 2 | 3,0 | 10,1 | 0 | 5 | 13,1 | 7,0 | 15,6 |

Таблица 17.2

Чистый доход для третьего водопользователя

| Подача воды S_3 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------|---|---|---|-----|------|------|
| Использованный расход | 0 | 0 | 0 | 3 | 4 | 5 |
| Максимальный доход $f_3(S_3)$ | 0 | 0 | 0 | 6,3 | 11,5 | 15,6 |

Таблица 17.3

Чистый доход в сумме второго и третьего водопользователя

| Подача воды S_2 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------------------------|---|-----|------|------|------|------|
| Использованный расход | 0 | 1 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| Максимальный доход $f_2(S_2)$ | 0 | 6,5 | 10,1 | 10,9 | 12,8 | 18,0 |

функции чистого дохода для промежуточных этапов расчета, приведенные в табл. 17.2 и 17.3.

На третьем этапе, когда анализируется суммарный доход для всех трех водопользователей, оказалось, что доход $f_1(S_1)$ уменьшается при выделении воды первому потребителю. Поэтому оптимальным следует считать такое распределение расхода 0, 1, 4, соответственно первому, второму и третьему водопользователю. Действительно, максимальный чистый доход равен 18 при отказе подачи воды первому потребителю, значит, второму и третьему достался весь расход, 5 ед.; при оптимальном потреблении вторым 1 ед. расхода остальных 4 ед. достались третьему.

17.6. Понятие об имитационном моделировании

Имитационное моделирование позволяет воспроизвести функционирование водохозяйственных систем в целях выяснения поведения систем при заданных значениях управляющих парамет-

ров. Это значит, что значения управляющих переменных рассматриваются как часть входных данных. В качестве имитационных могут использоваться моделирование рядов осадков и стока, модели распластывания паводков, производства гидроэнергии, модели орошения, рекреации, управления качеством воды и пр.

Имитационное моделирование следует рассматривать как статистический эксперимент, осуществляемый на ЭЦМ. Имитация не является способом оптимизации параметров модели, хотя имитационные модели могут давать оценочную информацию для каждого варианта введенных параметров. Поэтому они часто используются при исследовании водохозяйственных систем для детального анализа их функционирования и при использовании параметров, ранее определенных с помощью оптимизационных моделей.

Одним из основных назначений имитационного моделирования является оценка правильности наборов проектных и эксплуатационных параметров водохозяйственной системы.

Эти оценки, полученные для большого числа наборов параметров, дают возможность исследовать так называемую функциональную поверхность, или поверхность отклика. Такая поверхность отклика, или оценки расчета $f(x_1, x_2)$, построенная для случая двух параметров модели x_1 и x_2 , может иметь вид, подобно изображенной на рис. 17.4. Конфигурация поверхности отклика свидетельствует о характере изменения цели водохозяйственной системы в области тех или иных значений параметров, особенно вблизи оптимума. Анализ поверхности отклика для большого числа вариантов плана водохозяйственной системы позволит избежать пропуска глобального максимума целевой функции, например, в ситуации изображений на рис. 17.4, что возможно при оптимизации параметров.

В рассматриваемой главе приведено краткое описание только части основных методов оптимального программирования. Практическое применение этих методов иллюстрировано решением упрощенных задач водохозяйственного планирования. С подробным изложением методов оптимального программирования и их приложением к анализу водохозяйственных систем можно ознакомиться по специальной литературе, приведенной в списке литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов И. Н. Водоснабжение. — М.: Стройиздат, 1982. — 440 с.
2. Авакян А. Б., Шарапов В. А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. — М.: Энергия, 1977. — 399 с.
3. Александровский А. Ю., Черненко Г. Ф. Математическая модель водобалансовых и водноэнергетических расчетов режимов работы водохозяйственных систем//Изв. вузов СССР. Энергетика. — 1984. — № 11. — С. 104—108.
4. Алексеев Н. А. Стихийные явления в природе: проявления, эффективность защиты. — М.: Мысль, 1988. — 254 с.
5. Арсеньев Г. С. Повышение эффективности использования гидроэнергетических ресурсов р. Енисей//Гидротехническое строительство. — 1984. — № 10. — С. 4—6.
6. Арсеньев Г. С. Основы водохозяйственного проектирования. — Л.: Изд. ЛПИ, 1985. — 108 с.
7. Арсеньев Г. С. Практикум по водному хозяйству и водохозяйственным расчетам. — Л.: Изд. ЛГМИ, 1989. — 195 с.
8. Асарин А. Е. Новое в водохозяйственном проектировании и современные требования к охране окружающей среды//Теория и методы управления ресурсами суши. — М., 1982. — С. 89—95.
9. Асарин А. Е. Методические основы управления речным стоком при комплексном его использовании. — Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М.: Гидропроект, 1986. — 50 с.
10. Асарин А. Е., Бестужева К. Н. Водноэнергетические расчеты. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 224 с.
11. Бабкин В. И., Будыко М. И., Соколов А. А. Водные ресурсы и водообеспеченность СССР в настоящем и будущем//Генеральные доклады V Всесоюз. гидрол. съезда. — Л., 1986. — Т. 1. — С. 84—118.
12. Бахтиаров В. А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеиздат, 1961. — 430 с.
13. Бахтиаров В. А., Арсеньев Г. С. Диспетчерское управление водными ресурсами водохранилищ гидроэлектростанций Северо-Западного экономического района//Межведомственный сб., Изд. ЛПИ, 1978, вып. 67. — С. 82—95.
14. Васильев Ю. С., Хрисанов Н. И. Экологические аспекты гидроэнергетики. — Л.: ЛГУ, 1984. — 248 с.
15. Векслер А. Б., Доненберг В. М. Переформирование русла в нижних бьефах крупных гидроэлектростанций. М.: Энергоатомиздат, 1983. — 216 с.
16. Великанов А. Л. Водохозяйственные системы и расчетная обеспеченность. — Проблемы изучения и комплексного использования водных ресурсов. М.: Наука, 1978. С. 148—162.
17. Великанов А. Л., Коробова Д. Н., Пойзнер В. И. Моделирование процессов функционирования ВХС. М.: Наука, 1983. — 105 с.
18. Вендров С. Л. Ресурсы поверхностных вод и их использование. — В кн.: Роль водных ресурсов в жизни страны. М.: Наука, 1987. С. 7—21.
19. Водноэнергетические расчеты методом Монте-Карло/Под ред. А. Ш. Резниковского. — М.: Энергия, 1967. — 300 с.
20. Водохранилища и их воздействия на окружающую среду. — М.: Наука, 1986. — 366 с.
21. Воропаев Г. В. Воды суши и водные проблемы//Водные ресурсы. — 1987. — № 6. — С. 3—26.
22. Вотруба Л. и др. Проектирование водохозяйственных систем/Пер. с чешского. — М.: Стройиздат, 1984. — 367 с.

23. Вуглинский В. С. Водные ресурсы и водный баланс водохранилищ СССР. — Л.: Гидрометеоздат, 1991. — 224 с.
24. Гидрологические основы гидроэнергетики/Под ред. А. Ш. Резниковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. — 261 с.
25. Гидроэнергетика/Под ред. В. И. Обрезкова. — М.: Энергия, 1979. — 608 с.
26. Гидроэнергетика и комплексное использование водных ресурсов СССР/Под ред. П. С. Непорожного. — М.: Энергоиздат, 1982. — 560 с.
27. Гидроэнергетические установки/Под ред. Д. С. Щавелева. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 520 с.
28. Гильденблат Я. Д., Коренистов Д. В. Расчет режима речного водохранилища с учетом негоризонтальности водного зеркала//Тр. Гидропроекта, 1960, № 4. — С. 131—142.
29. Григорьев С. В. Потенциальные ресурсы малых рек СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1946. — 116 с.
30. Гришанин К. В. и др. Водные пути. — М.: Транспорт, 1986. — 400 с.
31. Грушевский М. С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. — Л.: Гидрометеоздат, 1982. — 288 с.
32. Зарубаев Н. В. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. — Л.: Стройиздат, 1976. — 224 с.
33. Зекцер И. С. Ресурсы подземных вод и их использование//Роль водных ресурсов в жизни страны. — М.: Наука, 1987. С. 22—25.
34. Карманов В. Г. Математическое программирование. — М.: Наука, 1980. — 250 с.
35. Картвелишвили Н. А. Регулирование речного стока. — Л.: Гидрометеоздат, 1970. — 218 с.
36. Комаров А. Н. Водохозяйственные расчеты к технико-экономическому обоснованию объектов мелиоративного строительства//Совершенствование мелиоративных систем в нечерноземной зоне РСФСР. — Л.: Изд. Ленгипроводохода, 1984. — С. 10—18.
37. Коган Б. Я. Расчет водного режима ниже проектируемой ГЭС при недостаточной гидрологической изученности//Тр. Гидропроекта, 1978, № 66. — С. 108—112.
38. Комплексное использование и охрана водных ресурсов/О. Л. Юшманов, В. В. Шабанов, И. Г. Галямина и др. — М.: Агропромиздат, 1985. — 303 с.
39. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеоздат, 1952. — 392 с.
40. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет//Проблемы регулирования речного стока. — М., 1959. Вып. 8. — С. 5—36.
41. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. — М.: Наука, 1981. — 255 с.
42. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. М.: Наука, 1982. — 270 с.
43. Лаукс Д., Стединжер Дж., Хейт Д. Планирование и анализ водохозяйственных систем. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 400 с.
44. Малинин Н. К. Теоретические основы гидроэнергетики. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 312 с.
45. Малые реки России (использование, регулирование, охрана, методы водохозяйственных расчетов) — Свердловск: Средн.-Урал. кн. изд-во, 1988. — 320 с.
46. Матарзин Ю. М., Богословский Б. Б., Мацкевич И. К. Специфика водохранилищ и их морфометрия. — Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1977. — 68 с.

47. Методическое руководство по составлению водохозяйственных балансов и ведению водного кадастра. — М.: СЭВ, 1981. — 118 с.
48. Методические указания о составе, содержании, порядке разработки, согласования, утверждения, уточнения схем комплексного использования и охраны водных ресурсов. ИВН 33—5.1.07—87. — М.: Изд. Минмелиоводхоза СССР, 1987. — 64 с.
49. Методы гидрологических расчетов при водохозяйственном проектировании. — Л.: Гидрометеониздат/ЮНЕСКО, 1984. — 167 с.
50. Методы системного анализа в мелиорации и водном хозяйстве. — Л.: Гидрометеониздат, 1983. — 260 с.
51. Нежиховский Р. А. Гидролого-экологические основы водного хозяйства. — Л.: Гидрометеониздат, 1990. — 230 с.
52. Определение расчетных гидрологических характеристик. СНИП 2.01.14—83. — М.: Стройиздат, 1985. — 37 с.
53. Основы выбора оптимальных решений в системах энергетики и водного хозяйства. — Л.: Изд. ЛПИ, 1977. — 83 с.
54. Пеньковская А. И., Плужников В. Н. Особенности составления водохозяйственного баланса крупных речных бассейнов//Регулирование использования воды в народном хозяйстве. — М., 1981. — С. 10—16.
55. Плешков Я. Ф. Регулирование речного стока. — Л.: Гидрометеониздат, 1975. — 560 с.
56. Положение о порядке использования водных ресурсов водохранилищ СССР. — М.: Изд. Минмелиоводхоза СССР, 1973. — 15 с.
57. Проектирование водохозяйственных систем/Под ред. В. Х. Отмана. — М.: Стройиздат, 1984. — 309 с.
58. Развитие гидроэнергетики и охрана окружающей среды. Круглый стол//Гидротехническое строительство, 1988, № 12. — С. 1—25.
59. Раткович Д. Я. Многолетние колебания речного стока. — Л.: Гидрометеониздат, 1976. — 256 с.
60. Регулирование и комплексное использование водных ресурсов. — М.: Наука, 1987. — 157 с.
61. Резниковский А. Ш., Рубинштейн М. И. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 105 с.
62. Рекомендации по составлению отчетных водохозяйственных балансов (пособие для органов по регулированию использования и охране вод). — Минск: Изд. ЦНИИКИВРа, 1981. — 46 с.
63. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. — Л.: Гидрометеониздат, 1983. — 283 с.
64. Сванидзе Г. Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. — Тбилиси: Мецнисреба, 1964. — 217 с.
65. Сванидзе Г. Г. Математическое моделирование гидрологических рядов. — Л.: Гидрометеониздат, 1977. — 296 с.
66. Системный подход к управлению водными ресурсами/Под ред. А. Бисваса. — М.: Наука, 1985. — 392 с.
67. Таха Х. Введение в исследование операций (в 2-х книгах). — М.: Мир, 1985. — 476, 493 с.
68. Терман И. А. Гидроэнергетические ресурсы//Сб. трудов Гидропроекта. — 1980. — № 70. — С. 52—58.
69. Укрупненные нормы водопотребления и водоотведения для различных отраслей промышленности. — 2-е изд. — М.: Стройиздат, 1982. — 527 с.
70. Фащевский Б. В., Шулика Л. Г. Методические рекомендации по определению дополнительных резервов воды за счет несинхронности стока при объединении водохозяйственных систем. — Минск: Изд. ЦНИИКИВРа, 1982. — 27 с.

71. Цветков Е. В. Расчет оптимального регулирования стока водохранилищами гидроэлектростанций на ЭВМ. — М.: Энергия, 1967. — 134 с.

72. Черняев А. М. Управление водными ресурсами в агропромышленном регионе. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 247 с.

73. Чокин Ш. Ч., Григорьев В. А., Редькин В. К. Методика расчета регулирования стока. — Алма-Ата: Наука, 1977. — 300 с.

74. Шелутко В. А. Многолетнее регулирование стока на основе учета ближних и дальних внутрирядных связей//Сб. науч. тр./Гос. гидрол. ин-т. — 1986. — Вып. 324. — С. 116—126.

75. Шикломанов И. А., Маркова О. А. Проблемы водообеспечения и переброски речного стока в мире. — Л.: Гидрометеоздат, 1987. — 294 с.

76. Щавелев Д. С., Федоров М. П., Губин М. Ф., Куперман В. Л. Экономика гидротехнического и водохозяйственного строительства. — Л.: Стройиздат, 1986. — 424 с.

77. Энергетика СССР в 1986—1990 годах/Под ред. А. А. Троицкого. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 351 с.

78. Энергетические ресурсы СССР. Гидроэнергетические ресурсы. — М.: Наука, 1967. — 599 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Баланс водохозяйственный 51
— водохранилища 112, 117, 224
- Бьеф верхний 148
— нижний 148, 155
- Водное хозяйство 9
Водные проблемы 14
Водные ресурсы 12
— — потенциальные 13
— — располагаемые 13
- Водный транспорт 41
Водообеспеченность 86
Водоотдача гидроузла 86
— — гарантированная 87
— — урезанная 87, 168
- Водопользователи 27
Водоснабжение промышленное 31
— сельскохозяйственное 37
— тепловых и атомных станций 35
— хозяйственно-питьевое 31
- Водохранилища регулирования годовичного 62
— — многолетнего 63
— — недельного 60
— — сезонного 61
— — суточного 60
— , воздействие на природу 69
- Габариты пути 42
Гидромодуль 39
Глубина нормируемая 42
— дифференцированная 44
- График диспетчерский 198
— нагрузки 149
— полива 39
— пропускной способности 152
- Издержки ежегодные 75
— — абсолютные 75
— — приведенные 80
- Интервал осреднения речного стока 90
- Каскад гидроузлов 171
Компоненты ВХК
— — , водный транспорт 27, 41
— — , водоснабжение 27, 31
— — , гидроэнергетика 27, 146
— — , орошение 27, 37
— — , рыбное хозяйство 27, 45
- Коэффициент асимметрии 131
— водопотребления 38
— зимний 148
— изменчивости 165
— использования установленной мощности 152
— использования стока 147
— минимума графика нагрузки 150
— модульный 115, 116, 122
— мощности 147
— объема водохранилища 116, 121
— плотности графика нагрузки 150
— регулирования стока 147, 153
— суточной неравномерности 33
— учета фактора времени 80
— часовой неравномерности водопотребления 34
— экономической эффективности 79
- Методы исследования ВХС
— динамического программирования 258
— имитационного моделирования 262
— линейного программирования 251
— нелинейного программирования 256
- Методы расчета
— вероятностные 94, 122, 125
— гидравлические 219, 233
— календарные 94, 106, 114, 117, 135, 139
— каскадного регулирования 175, 187, 190, 195
— проектного притока в водохранилище 228, 229
— статистических испытаний 94, 129
— экономической эффективности 74
- Мощность водотока 22
— гидроэнергетической установки 146
— агрегата 151
— — — гарантированная 146

- — — располагаемая 152
- — — установленная 152
- Наводнения** 47
 - , методы борьбы 49
 - , причины 47
- Напор гидроэлектростанций**
 - — брутто 146
 - — нетто 147
 - — располагаемый 152
- Норма**
 - оросительная 38
 - поливная 38
 - хозяйственно-питьевого водоснабжения 32
- Обеспеченность водоподачи** 86
 - приведенная 88
- Объем водохранилища** 57
 - — динамический 220
 - — мертвый 56, 57
 - — многолетний 121, 122, 125, 129
 - — полезный 56, 57
 - — полный 56
 - — резервный (противонаводочный) 231
 - — сезонный 61, 116, 132, 141
 - — статический 99
 - — форсированный 56, 57
- Период маловодный** 63
 - первоначального наполнения 164
 - сработки водохранилища 170
- Площадь зеркала** 56, 97
- Потери воды** 101
 - — на испарение 101
 - — на ледообразование 104
 - — на шлюзование 103
 - — на фильтрацию 103
- Правила использования водных ресурсов** 197
 - диспетчерские 198
- Проектный уровень** 42
- Расход воды**
 - — агрегата ГЭС 151
 - — водотока 22, 90
 - — нижнего бьефа 148
 - — полезноиспользуемый 157
 - — средневзвешенный 157
 - — холостого сброса 148
- Расчеты водохозяйственные** 81
 - водноэнергетические 146
- Регулирование стока вторичное** 65
 - — годовое 62
 - — каскадное 60
 - — компенсирующее 64, 174
 - — многолетнее 60, 63
 - — недельное 60
 - — неперiodическое 65
 - — сезонное 60, 61
 - — суточное 60
- Система водохозяйственная (ВХС)** 246
 - энергетическая 149
 - срок окупаемости 75
 - Судовой ход 42
 - Схема использования водных ресурсов 50
 - каскадного регулирования стока 172
- Трансформация зарегулированного стока** 238
 - паводков 219
 - половодий 219
 - суточной волны 243
- Уравнение баланса водного** 37, 96
- Уровень ежегодной сработки** 219, 224
 - мертвого объема 57
 - подпорный 56
 - — нормальный 56
 - — форсированный 57
- Энергия водотока** 23, 178
 - электрическая (ГЭС) 147
- Энергоемкость водохранилища** 178
- Энергоресурсы нетрадиционные** 26
 - рек 22—25
 - — потенциальные 22
 - — технические 25
 - — экономические 25
 - — , степень их освоения 25

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 3 |
| ✓ Введение | 6 |
| РАЗДЕЛ I. ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО | 9 |
| Глава 1. Основные сведения о водном хозяйстве | — |
| 1.1. Определение и задачи водного хозяйства | 12 |
| 1.2. Водные ресурсы и их распределение | 14 |
| 1.3. Водные проблемы и пути их решения | 22 |
| 1.4. Гидроэнергетические ресурсы и методы их определения | 27 |
| 1.5. Комплексное использование водных ресурсов и связь их с природными и экономическими условиями | 29 |
| Глава 2. Требование различных отраслей хозяйства к водным ресурсам и их качеству | 29 |
| 2.1. Нормы, расход и режим хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения | 31 |
| 2.2. Водоснабжение тепловых и атомных электростанций | 35 |
| 2.3. Орошение | 37 |
| 2.4. Водный транспорт и лесосплав | 41 |
| 2.5. Рыбное хозяйство | 45 |
| 2.6. Борьба с наводнениями | 47 |
| Глава 3. Планирование использования водных ресурсов | 50 |
| 3.1. Задачи схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов | — |
| 3.2. Водохозяйственные балансы и принципы их составления | 51 |
| Глава 4. Водохранилища и их хозяйственное значение | 56 |
| 4.1. Определение и типы водохранилищ | — |
| 4.2. Виды регулирования стока водохранилищами и их основные характеристики | 60 |
| 4.3. Экономические и природоохранные условия, определяющие местоположение и параметры водохранилищ | 66 |
| 4.4. Требования различных отраслей хозяйства к уровненным режимам водохранилищ и нижних бьефов гидроузлов | 68 |
| 4.5. Влияние водохранилищ на гидрологический режим водотоков и природу прилегающих территорий | 69 |
| 4.6. Предотвращение неблагоприятных последствий создания водохранилищ | 72 |
| Глава 5. Экономическая оценка водохозяйственных мероприятий | 74 |
| РАЗДЕЛ II. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ | 81 |
| Глава 6. Определение и задачи водохозяйственных расчетов | — |
| 6.1. Задачи водохозяйственных расчетов | 83 |
| 6.2. Развитие методики водохозяйственных расчетов | 86 |
| 6.3. Расчетная обеспеченность водопользования различными отраслями хозяйства и учет ее в водохозяйственных расчетах | 89 |
| Глава 7. Исходные данные для водохозяйственного проектирования | — |
| 7.1. Общие положения | — |
| 7.2. Гидрологическая информация и способы ее использования | — |

| | |
|---|------------|
| 7.3. Особенности подготовки исходных гидрологических данных при использовании естественного водоема (озера) под водохранилище | 95 |
| 7.4. Топографические характеристики водохранилищ | 97 |
| 7.5. Гидрогеологические и другие материалы | 99 |
| 7.6. Потери воды из водохранилищ | 101 |
| Глава 8. Расчеты сезонного регулирования стока водохранилищами | 106 |
| 8.1. Использование интегральных кривых для расчета сезонного регулирования стока | — |
| 5 8.2. Обобщенные методы расчета сезонного регулирования стока | 114 |
| 6 8.3. Расчеты сезонного регулирования стока балансовым табличным способом | 117 |
| Глава 9. Расчеты многолетнего регулирования стока водохранилищами | 121 |
| 9.1. Основные положения | — |
| 8 9.2. Расчеты регулирования методами теории вероятностей и математической статистики | 122 |
| 9.3. Расчеты многолетнего регулирования графическим способом по интегральной кривой стока | 135 |
| 3 9.4. Расчеты многолетнего регулирования стока балансовым табличным способом по календарным гидрологическим рядам | 139 |
| Глава 10. Особенности водохозяйственных расчетов при обосновании параметров водохранилищ для мелиорации | 140 |
| Глава 11. Водноэнергетические расчеты | 146 |
| 11.1. Определение и задачи | — |
| 11.2. Роль гидроэлектростанций в энергосистемах и их участие в покрытии графиков нагрузки | 149 |
| 11.3. Характеристики гидросилового оборудования ГЭС и понятие установленной мощности | 151 |
| 11.4. Расчеты к обоснованию параметров водохранилищ и ГЭС обобщенными приемами | 153 |
| 11.5. Водноэнергетические расчеты по календарным стокowym рядам | 159 |
| Глава 12. Специальные водохозяйственные и водноэнергетические расчеты | 164 |
| 12.1. Первоначальное наполнение водохранилища и режим работы ГЭС | — |
| 12.2. Отдача из водохранилища за пределами расчетной обеспеченности | 168 |
| 12.3. Длительность периода сработки водохранилища многолетнего регулирования стока | 170 |
| Глава 13. Каскадное регулирование стока | 171 |
| 13.1. Общие положения | — |
| 13.2. Схемы каскадного регулирования стока | 172 |
| 13.3. Компенсирующее регулирование стока в каскаде, связанном гидравлически | 174 |
| 13.4. Компенсирующее регулирование стока между каскадами, не связанными гидравлически | 182 |
| 13.5. Основные положения методики обобщенных расчетов компенсирующего регулирования стока в составе каскадов и энергетических объединений | 186 |
| Глава 14. Основные правила использования водных ресурсов водохранилищ | 197 |
| 14.1. Краткий обзор современного состояния методики управления водными ресурсами водохранилищ | — |
| | 271 |

| | |
|--|------------|
| 14.2. Диспетчерские графики управления работой водохранилищ сезонного регулирования стока и принципы их построения | 203 |
| 14.3. Диспетчерские графики при многолетнем регулировании стока и принципы их построения | 210 |
| 14.4. Использование прогнозов стока для повышения эффективности работы водохранилищ | 215 |
| 14.5. Основные приемы управления работой каскадов водохранилищ и ГЭС | 216 |
| Глава 15. Расчеты пропуска стока половодий и паводков через гидротехнические сооружения | 219 |
| 15.1. Задачи и средства регулирования стока половодий и паводков | — |
| 15.2. Статический и динамический объемы водохранилищ | 220 |
| 15.3. Расчеты пропуска стока половодий и паводков через гидротехнические сооружения | 223 |
| 15.4. Основные положения выбора противопаводочного (резервного) объема водохранилищ | 231 |
| Глава 16. Гидравлические расчеты при водохозяйственном проектировании | 233 |
| 16.1. Расчет и построение кривых свободной поверхности на протяжении водохранилища | — |
| 16.2. Оценка влияния водохранилища на расходы (уровни) воды в нижнем бьефе гидроузла | 238 |
| 16.3. Основные положения расчетов неустановившегося движения воды в нижнем бьефе при суточном регулировании мощности ГЭС | 243 |
| Глава 17. Оптимизация режимов эксплуатации водохозяйственных систем | 246 |
| 17.1. Понятие о водохозяйственной системе (ВХС) | — |
| 17.2. Построение математических моделей ВХС | 248 |
| 17.3. Применение моделей линейного программирования при решении водохозяйственных задач | 251 |
| 17.4. Расчет нелинейных моделей ВХС с использованием метода множителей Лагранжа | 256 |
| 17.5. Метод динамического программирования | 258 |
| 17.6. Понятие об имитационном моделировании | 262 |
| Список литературы | 264 |
| Предметный указатель | 268 |

Учебник

Арсеньев Герман Семенович, Иваненко Александр Григорьевич

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Редактор Е. Э. Булаховская. Художник Г. Б. Бурмистров. Художественный редактор Б. А. Бураков. Технический редактор Н. В. Морозова. Корректор О. В. Андреева.

ИБ № 2090

Сдано в набор 04.01.93. Подписано в печать 07.04.93. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 17,0. Кр.-отт. 17,0. Уч.-изд. л. 19,49. Тираж 600 экз. Индекс ГЛ-8. Заказ № 9.
Гидрометеоиздат. 199397. Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

Ордена Трудового Красного Знамени ГП «Техническая книга» типография № 8 Мининформпечати РФ. 190000, г. Санкт-Петербург, Прачечный пер., д. 6.