

Камчатский государственный технический университет

Г.В. Ивашкевич, А.С. Латкин, В.А. Швецов

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

*Рекомендовано Дальневосточным региональным
учебно-методическим центром в качестве
учебного пособия для студентов направления
511100 «Экология и природопользование» и специальностей
320600 «Комплексное использование и охрана водных ресурсов»,
320500 «Мелиорация, рекультивация и охрана земель»,
320800 «Природоохранное обустройство территорий»
вузов региона*

Петропавловск-Камчатский
2004

УДК 556.16+556.18

ББК 38.77

И24

Рецензенты:

А.С. Федоровский,

доктор географических наук, профессор,
декан геофизического факультета ДВГУ

Н.Н. Бортин,

доктор географических наук,
директор ДПФГУП ДальНИИВХ

Ивашкевич Г.В., Латкин А.С., Швецов В.А.

И24 Регулирование речного стока: Учебное пособие. –
Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. – 124 с.

ISBN 5–328–00056–0

Настоящее учебное пособие представляет собой сокращенный курс основ и практических расчетов регулирования речного стока для водоснабжения, ирригации, гидроэнергетики, тепловых энергоустановок и других водопользователей. Освещаются расчеты основных параметров водохранилищ, приводятся правила управления их работой с наиболее целесообразным использованием стока (по диспетчерским графикам). Рассматривается влияние изменений гидрологических параметров на отдачу водохранилищ, излагаются принципы регулирования паводий и паводков.

Для замены сложных и трудоемких расчетов приведены расчетные графики и таблицы. Приводятся практические подходы по эксплуатации водохранилищ с применением различных видов регулирования стока рек.

УДК 556.16+556.18

ББК 38.77

ISBN 5–328–00056–0

© КамчатГТУ, 2004

© Авторы, 2004

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное социальное и экономическое развитие стран мира характеризуется все большим вовлечением водных ресурсов в сферу деятельности человека. Водные ресурсы во всем их многообразии (реки, озера, моря и др.) с древнейших времен оказывают существенное влияние на развитие общества. В одних случаях, когда стихийность режима природных вод (наводнение, пересыхание рек) наносила тяжелые разрушения или вызывала даже бедствия, это влияние было тормозящим, в других случаях водные объекты благоприятствовали развитию ирригации, водного транспорта, торговых отношений между государствами и т. п.

Постепенно изучая водные ресурсы и приспосабливаясь к существующему гидрологическому режиму, человечество стало активно воздействовать на естественный режим природных вод применительно к своим многочисленным потребностям. При этом технический уровень всевозможных гидротехнических мероприятий отражал развитие производительных сил в различные эпохи. Освоение главным образом рек и озер, происходившее во многих случаях наряду со строительством каналов и других гидротехнических сооружений, издавна играло достаточно важную роль в жизни разных стран мира.

В отличие от других видов природных ресурсов, запасы которых на любой территории постоянны, вода под влиянием солнечной энергии и силы тяжести находится в постоянном движении — круговороте. Она непрерывно расходуется и возобновляется, объединяя во взаимосвязанный цикл воды атмосферы, океана, земной коры, биосферы. Вода, таким образом, является возобновляемым природным ресурсом, и это ее уникальное свойство широко используется человечеством в различных регионах нашей страны и мира.

Наибольших масштабов и наиболее интенсивно использование водных ресурсов в нашей стране достигло в период 70–80-х го-

дов. Ныне различные водохозяйственные мероприятия, носящие комплексный характер, могут существенно влиять на экологическое состояние довольно больших территорий нашей страны. Они являются важной составной частью экономического развития народного хозяйства страны и планов использования и преобразования природы.

Влияние величайших гидротехнических строек в Европе и в Сибири на реках Волга, Обь, Дон, Енисей сказывается на состоянии окружающей среды на громадных территориях не только нашей страны, но и за ее пределами. Строительство и последующая эксплуатация водохранилищ для целей водоснабжения, орошения, тепловых электростанций и гидроэлектрических станций на средних и малых реках приняло повсеместный массовый характер, в том числе и на Дальнем Востоке, включая Камчатку.

При этом важное место в научном и водохозяйственном обосновании различных гидротехнических и водохозяйственных мероприятий занимают гидрология и относительно молодая отрасль науки – теория регулирования и использования речного стока.

Значительную роль в этой области знания сыграли работы известных русских ученых А.И. Воейкова, Е.В. Оппокова, Е.В. Ольдекопа, Н.Е. Долгова, Е.А. Гейнца, Н.И. Соколова и др. Их трудами гидрология и теория регулирования стока из описательных дисциплин превратились в мощное орудие подчинения водной стихии многообразным комплексным народнохозяйственным потребностям нашей Родины.

В настоящем издании в краткой форме изложены основы водохозяйственных расчетов и практических приемов регулирования речного стока применительно к различным отраслям народного хозяйства.

При ее подготовке использованы главным образом работы М.В. Потапова, С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, А.Д. Саваренского, В.А. Бахтиярова. Учтены ценные советы рецензентов.

Авторы приносят благодарность всем лицам, способствовавшим улучшению книги, ускорению ее издания, и с должным вниманием примут замечания по ее изложению и содержанию.

Глава 1

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ УСТАНОВКИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОХРАНИЛИЩ

1.1. Режим работы установки

Комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающих непосредственно регулирование стока, использование воды или отвод ее из водоисточника для тех или иных народнохозяйственных целей, называется водохозяйственной установкой.

В зависимости от условий и назначения на одну установку может быть возложено решение одной конкретной частной задачи или целого комплекса задач, например: одновременно по регулированию стока, орошению, отводу вод и т. д. Установка, решающая одну задачу, называется отраслевой установкой, а несколько задач сразу – комплексной.

Обычно водохозяйственная установка представляет собой несколько гидротехнических сооружений специального назначения, например: плотина и водосброс, здание гидростанции, деривация, напорный канал и др.

Распределение по времени воды, поступающей к водохозяйственной установке при естественном гидрологическом режиме реки в силу различных причин, как правило, не совпадает с требованиями водопотребителя или водопользователя. Обычно в многоводные периоды река несет намного больше воды, чем требуется, и избытки ее не используются совсем. При низком речном стоке – наоборот: иногда даже необходимо ограничивать водопотребление из-за недостатка воды.

В подавляющем большинстве случаев запросы потребителей на воду удастся удовлетворить путем приспособления их к естественным изменениям речного стока. При этом с помощью водохозяйственной установки используются избытки воды многоводных периодов. Режим работы водохозяйственной установки представляет собой результат согласования (увязки) требований потребителя воды (или энергии) с естественными водными ресурсами используемого источника.

В общем случае задача сводится к выяснению необходимых размеров сооружений, условий их эксплуатации и к оценке получаемого в результате народнохозяйственного эффекта. Поэтому проектирование водохозяйственной установки должно начинаться с подробного исследования элементов гидрологического режима водного объекта, от которых зависят размеры и конструктивные особенности самой установки.

При проектировании установки обычно решаются следующие наиболее главные водохозяйственные задачи:

а) определение наиболее оптимальных или целесообразных размеров водохозяйственной установки и величины ее водо- или энергоотдачи. В таком виде ставится задача в засушливых районах для размещаемых здесь новых предприятий и нуждающихся в большом водопотреблении. Подобным образом также обстоит дело при проектировании гидроэлектростанций. При этом имеется в виду, что энергосистема должна обеспечивать потребителей еще и при различных комбинациях мощности ГЭС и ГРЭС, включенных в единую энергосистему;

б) выбор и установление на рассматриваемом водоисточнике размеров основных гидротехнических сооружений при заданном водозэнергопотреблении. Примером может служить задача водоснабжения населенного пункта или промышленного предприятия, которые нуждаются для нормальной работы в конкретных объемах воды;

в) получение оптимального эффекта от работы водохозяйственной установки при уже установленных ее размерах. Эта задача часто встречается при составлении правил эксплуатации водохозяйственной установки, а также в упрощенном виде решается в расчетных схемах «а» и «б».

Решение перечисленных задач при известном водном режиме водоисточника сводится к выявлению хозяйственного эффекта по различным вариантам подпора (размеров сооружений) и правилам эксплуатации установки. Такие решения и составляют сущность водохозяйственного расчета.

При регулировании речного стока, как известно, можно планомерно перераспределять сток реки с целью наиболее полного удовлетворения потребности народного хозяйства в необходимых объемах воды. В этом случае в задачу водохозяйственного

расчета входит не только выявление особенностей работы водохозяйственной установки, но также и выбор наиболее целесообразного режима ее эксплуатации, т. е. режима наполнения и сброски используемого водохранилища.

Обычно условия работы установки определяются режимом отдачи воды или энергии, а также рядом показателей, от которых зависят размеры и даже сохранность самой установки.

Исследования и определение величины сбрасываемых установкой расходов воды необходимо для определения типов, размеров, а также условий работы водосливов и водоспусков. Нередко регулирование сброса высоких вод является одной из основных и очень важных задач, решаемых установкой, особенно на водотоках с паводочным режимом.

Не менее важным является также исследование уровней воды. В частности, от уровней верхнего и нижнего бьефов зависят условия отвода воды из водохранилища в каналы и водоприемники. Ими же определяется высота подачи воды насосами к потребителям, напор на турбинах ГЭС. С режимом уровней связан и расчет устойчивости плотин, гидравлический расчет водосливов, водоспусков и др. А кривые подпора уровней воды от плотины вверх по течению реки характеризуют размеры затопления и подтопления прилегающих к водохранилищу территорий.

Таким образом, основными элементами режима, необходимыми для оценки работы водохозяйственной установки, являются:

- расходы воды, подаваемой потребителям (с разделением и распределением между ними); мощности ГЭС;
- сбросные расходы; уровни верхнего бьефа (у плотины, у водоприемников и в характерных пунктах по длине водохранилища);
- уровни нижнего бьефа (у плотины, в пунктах выхода суходоходной и силовой деривации и т. д.);
- напоры, используемые ГЭС.

Обычно расходы воды, мощности, уровни обоих бьефов непосредственно у плотины и напоры изображаются в виде хронологических графиков колебания и кривых продолжительности этих величин за расчетный многолетний период стока (рис. 1). Эти последние кривые показывают, например, сколько времени потребитель получал полную или неполную норму воды или энергии.

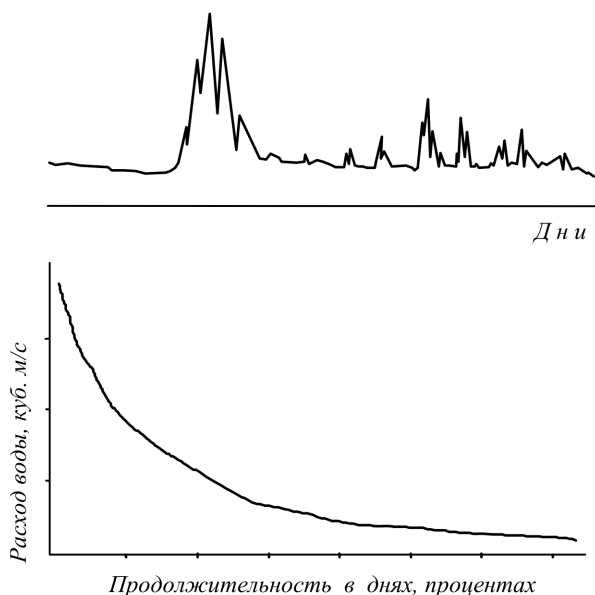


Рис. 1. Хронологический график колебания расходов воды и кривая продолжительности за расчетный период р. Ича – с. Ича

Построение их излагается в других курсах и выходит за рамки данной дисциплины. Абсцисса каждой точки такого графика показывает процент времени, в течение которого данная характеристика превышала величину, изображаемую соответствующей ординатой. Разность абсцисс двух точек кривой дает процент времени, когда характеристика колебалась в пределах ординат, относящихся к этим абсциссам.

Если условия работы установки мало изменяются по времени года, то упомянутые графики целесообразно строить для всего года. В противном случае каждому сезону отвечает свой график, но при этом по оси абсцисс за 100% времени принимается не год, как в первом случае, а лишь часть его – сезон. При проектировании обычно применяются следующие разновидности графиков продолжительности элементов водного режима: обобщенный, средний и график за характерные годы.

1. *Обобщенный* график продолжительности служит для изображения распределения расходов воды и других элементов ре-

жима, к примеру, за весь многолетний период, принятый для водохозяйственных расчетов. Абсциссы такого графика, отвечающие каждому значению ординаты, представляют собой средние арифметические из абсцисс для той же ординаты по графикам продолжительности отдельных лет (или сезонов – для посезонных графиков). Эти графические построения являются основными интерпретаторами, используемыми для вероятностной оценки режима работы установки в условиях будущей ее эксплуатации.

2. *Средний* график продолжительности применяется часто для характеристики режима в средних гидрологических условиях. Построение этого графика производится путем вычисления средних арифметических из ординат при одинаковых абсциссах по кривым отдельных лет. Такого рода график принципиально отличается от применявшегося гидрографа «среднего фиктивного года», который строился путем осреднения расходов воды в одни и те же даты за ряд лет. При подобном построении не учитывались сдвиги по годам однородных фаз стока (ранние и поздние половодья и т. д.), сглаживались паводки, наблюдавшиеся лишь в отдельные годы. Кроме этого, гидрограф приобретал нереальные плавные очертания, искажающие фактические условия использования стока.

3. Графики продолжительности за *характерные годы* применяются для отличающихся от средних по стоку лет: многоводных, маловодных и других лет – и строятся по характерным расчетным гидрографам.

Рассмотренные графики используются для элементов режима, осредненных по декадным или месячным интервалам времени. При этом критические величины элементов (например, минимальная среднедекадная мощность ГЭС) исследуются отдельно – расчет ведется по более мелким интервалам. Кривая продолжительности годовых значений энергovyработки ГЭС строится по целым годовым величинам полученной энергии за весь расчетный период стока.

Изучение экстремальных элементов режима стока имеет большое значение при определении размеров сооружений установки. Для их определения строятся графики обеспеченности этих элементов. Каждая ордината этого графика изображает величину, относящуюся к какому-либо году, а ее абсцисса – обес-

печенность этой величины, выраженную в долях от общего числа лет, принимаемого за единицу (или за 100). При этом абсцисса означает не долю времени, а лишь частоту повторения исследуемой величины в расчетном периоде.

Кривые продолжительности позволяют судить о повторяемости отдельных элементов режима, но по ним невозможно получить представление обо всех особенностях режима одновременно, о связи между колебаниями различных элементов и др. Поэтому этот недостаток восполняется хронологическими графиками хода конкретных водохозяйственных элементов за весь исследуемый ряд лет, который принимается в качестве прототипа будущего режима стока, а также режима работы водохозяйственной установки.

Для анализа работы действующей установки за конкретный период времени подобные построения выполняются путем обработки материалов хронологических таблиц и графиков по отчетным данным. При проектировании же такие графики строятся по результатам водохозяйственного расчета, основанного непосредственно на многолетних данных о стоке. Тем не менее этот метод расчета, наглядно отражая ход всех элементов режима за многолетие и позволяя исследовать водохозяйственные схемы любой сложности (как отмечено выше), имеет ряд существенных недостатков.

В связи с этим обстоятельством наряду с таким эмпирическим методом расчета по многолетним рядам стока применяется также вероятностный метод, основанный на обобщенных параметрах стока. Оба эти метода, дополняя друг друга, дают возможность надежно обосновать размеры, производительность и режим работы водохозяйственной установки.

1.2. Водохранилища, их основные типы и характеристики

Любой достаточно крупный водоем, в котором временно накапливается вода для последующего ее использования, называется водохранилищем. Кроме естественных водоемов, существует несколько видов искусственных водохранилищ. Наиболее часто встречаются следующие их разновидности:

1. Металлические или железобетонные резервуары различных размеров, устраиваемые на поверхности земли обычно на возможно

высоком искусственном основании, называются водонапорными башнями, а под ее поверхностью на достаточно возвышенных отметках местности – подземными резервуарами. Подобного рода сооружения – это обычные традиционные элементы систем водоснабжения различных населенных пунктов, предприятий, железнодорожных станций и т. п. Предназначены они для покрытия внутрисуточной неравномерности подачи воды из источника в случаях значительных колебаний (неравномерности) водопотребления. Определение их объема аналогично расчету бассейнов суточного регулирования мощности гидроэлектростанции.

2. Искусственные водоемы, устраиваемые в выемке, часто с родниковым питанием (копани), или в полувыемке, а также путем обвалования горизонтальной или слегка наклонной местности. Служат они главным образом для местного сельскохозяйственного водопользования, в частности для лиманного орошения весенним стоком собственной, в том числе и ниже расположенных площадок, а также, например, в качестве бассейна суточного регулирования деривационной ГЭС и для других целей.

3. Наливные водохранилища на ограждаемых дамбами участках местности, пополняемые из внешних источников. Часто такие водоемы создаются для охлаждения теплообменников ГРЭС, и тогда они занимают площадь в несколько квадратных километров, обычно в пределах широких пойм или вблизи каналов.

4. Водоохранилища, создаваемые в речных долинах при помощи различного рода и назначения плотин. Эти водоемы имеют наибольшее распространение.

1.2.1. Емкостные и гидравлические характеристики

При разных отметках уровня чаша водохранилища характеризуется конфигурацией, величинами площадей водной поверхности (зеркала), объемов, глубин и других показателей. Обычно исходной для определения всех этих показателей является зависимость площади водохранилища от отметки уровня воды в нем: $F = f(Z)$.

Площадь зеркала определяется планиметрированием горизонталей по топографическим картам масштабов 1:10 000, 1:25 000 и 1:50 000 с сечением рельефа соответственно через 2,5

и 10 м. Обычно на этих картах имеются и полугоризонталы соответственно через 1; 2,5; 5 м, которые также можно использовать.

С повышением уровня водохранилища площадь его зеркала увеличивается, и зависимость $F = f(Z)$ представляет собой возрастающую неправильную ломаную линию с изломами в точках найденных площадей (рис. 2).

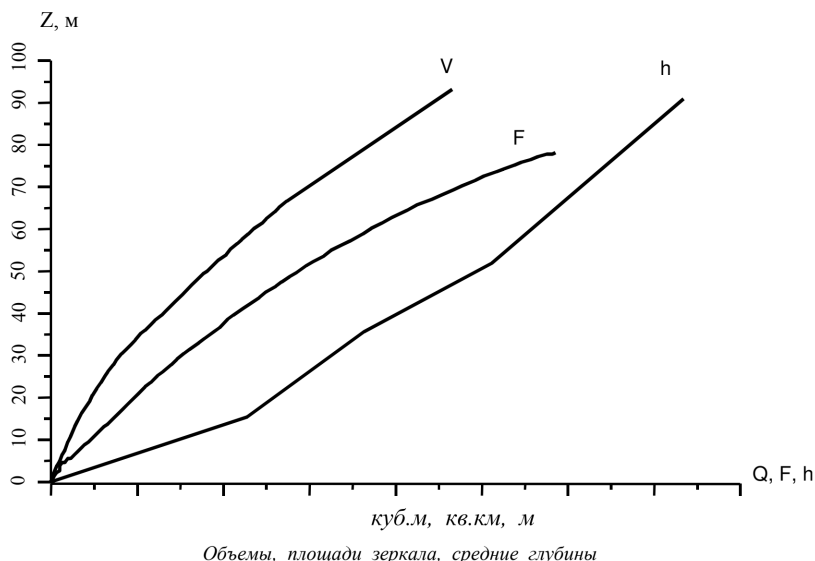


Рис. 2. Кривые морфометрических характеристик водохранилища

Элементарный объем водохранилища равен $dV = FdZ$, а полный объем равен площади между осью ординат и кривой $F = f(Z)$, т. е. выразится интегралом следующего вида:

$$V = \int_{Z_0}^Z F dZ ,$$

где Z_0 и Z – отметки дна и уровня воды.

Совершенно очевидно, что элементарные объемы между отметками уровней следует находить по соотношению

$$\Delta V = \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \Delta h .$$

Конкретный объем водохранилища V до какой-нибудь отметки находится суммированием элементарных объемов от самой нижней точки чаши до рассматриваемой отметки. Подобный расчет целесообразно вести в табличной форме (табл. 1).

Кривая объемов, представляющая собой зависимость между емкостью и уровнем наполнения $V = f(Z)$, является основной характеристикой чаши водохранилища.

Таблица 1

Координаты кривых морфометрических характеристик водохранилища

Отметка Z , м	Площадь, кв. км		Объем, млн. куб.м		Средняя глубина $h_{ср}$, м	Площадь литорали	
	F	$\Delta V = \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \Delta h$	ΔV	V		L, тыс. кв.м	% от площади зеркала
51,0	0,0	3 9 15	3 9 15	0,0	0,0	—	—
52,0	6,0			3,0	0,5	6,0	100
53,0	12,0			12,0	1,0	12,0	100
54,0	18,5			27,0	1,46	12,5	67,5

Поверхность неподвижной жидкости, находящаяся в гидростатическом равновесии, обладает горизонтальностью уровня. Построенная в этом предположении кривая зависимости уровня воды от объемов воды водохранилища называется *статической кривой*.

Горизонтальность поверхности водоема исчезает при пропуске больших расходов половодья и паводков. Объем водохранилища зависит тогда от очертания кривой подпора, т. е. от величины поступающего расхода воды Q , гидравлических характеристик всего подпорного бьефа и непосредственно уровня воды у плотины Z . Кривая объемов $V = f(Q, Z)$ в этом случае называется *динамической кривой*.

Под воздействием на открытую водную поверхность сильного и продолжительного ветра одного и того же направления может наблюдаться нарушение горизонтальности водной поверхности водоема (ветровая денивелиция). При этом образуется перекося водной поверхности с понижением уровня у подветренного берега (сгон) и повышением его перед наветренным берегом (нагон).

Обычно статическая кривая объемов имеет вид плавной кривой параболического типа. В частном случае, если зависимость $F = f(Z)$ изображается прямой, то кривая $V = f(Z)$ превращается в квадратическую параболу. При постоянной площади зеркала (водохранилище или любой водоем с вертикальными берегами, стенками) кривая объемов превращается в прямую линию.

В частном случае, если имеется кривая объемов и известна площадь дна водоема у плотины (обычно она принимается равной нулю), то кривую $V = f(Z)$ можно восстановить обратным пересчетом, исходя из объемов водохранилища.

Как правило, для русловых подпорных бьефов кривая $V = f(Z)$ строится по участкам длиной l , на которые русло разбивается поперечниками от плотины до места выклинивания подпора. При этом находят площадки f_i между соответственными смежными отметками на поперечниках по концам участка и часть его объема.

Остальные построения для кривых объемов каждого участка аналогичны вышеизложенным.

Кроме объема, не менее важными морфометрическими характеристиками водохранилища являются также такие параметры, как средняя глубина $h_{cp} = V/F$ и удельная площадь зеркала (приходящаяся на единицу объема) $f_{уд.} = F/V$ кв.м/куб.м.

Площадь мелководья водоема (литорали) с малой глубиной при заданной отметке горизонта воды Z определяется с помощью кривой $V = f(Z)$ как разность площадей зеркала при данной отметке и при отметке на 1,5–2,0 м ниже. Необходимо отметить, что величины средней глубины водоема и площади мелководья могут с повышением уровня то увеличиваться, то уменьшаться.

Представляется также возможным построить кривую распределения глубин водохранилища при конкретном значении нормального подпорного горизонта (НПГ), которая представляет

собой ту же кривую площадей с осью глубин, направленной вниз, и с началом координат на уровне НПГ: ось абсцисс с тем же масштабом площадей перемещается на уровень НПГ. Площади можно откладывать тоже в долях целого или в процентах, считая величину F при НПГ за 1,0 или за 100. По этому графику в новой системе координат можно определять, какая часть площади водохранилища при НПГ имеет глубину больше заданной или находится, например, в пределах глубин от 3 до 4-х м и т. п. Эта кривая (при выражении F в кв.км) пригодна и для характеристики распределения глубин не только при НПГ, но и при других отметках. Однако для каждой отметки необходимо перемещать по вертикали ось абсцисс.

Кривая распределения глубин, как и кривая площадей литорали, используется, например, для проектирования противомалярийных мероприятий на водохранилище, при судоходстве, а также для других целей.

Конкретно для гидроэнергетических целей иногда строится кривая сработки водохранилища. В этом случае по оси абсцисс откладываются расходы за счет сработки, а по оси ординат – отметки горизонта воды. Очевидно, на отметке нормального подпорного горизонта (НПГ) сработка равна нулю. При сработке расходом Q_1 в течение dt суток объем наполнения уменьшится на $86\,400Q_1dt$. Соответствующая остатку емкости отметка горизонта воды откладывается в принятом масштабе отметок. При расходе Q_2 за тот же срок dt будет иная отметка остаточного наполнения и т. д. Кривая соответствует только одному сроку сработки водохранилища при разных расходах. Поэтому иногда приходится строить несколько кривых для сроков сработки dt , равных 5, 10 суткам, 1 месяцу и т. д.

Кроме вышерассмотренных кривых, к характеристикам гидроузла, влияющим на режим работы водохранилища, относятся еще кривая связи расходов и уровней $Q = f(Z)$ нижнего бьефа сооружений, а также гидравлические характеристики водосбросных и водопроводящих устройств.

Кривая расходов нижнего бьефа соответствует, как правило, установившемуся или медленно изменяющемуся гидравлическому режиму и строится непосредственно по гидрометрическим данным. Однако в связи с невысокой точностью измерений, де-

формацией русла и в силу других причин точки измеренных расходов получают на графике несколько разбросанными. При проектировании, чтобы учесть подобные возможные отклонения, рекомендуется принимать гидравлическую характеристику нижнего бьефа в виде пучка кривых: основной кривой и двух огибающих, ограничивающих область возможных колебаний связи расходов и уровней (рис. 3).

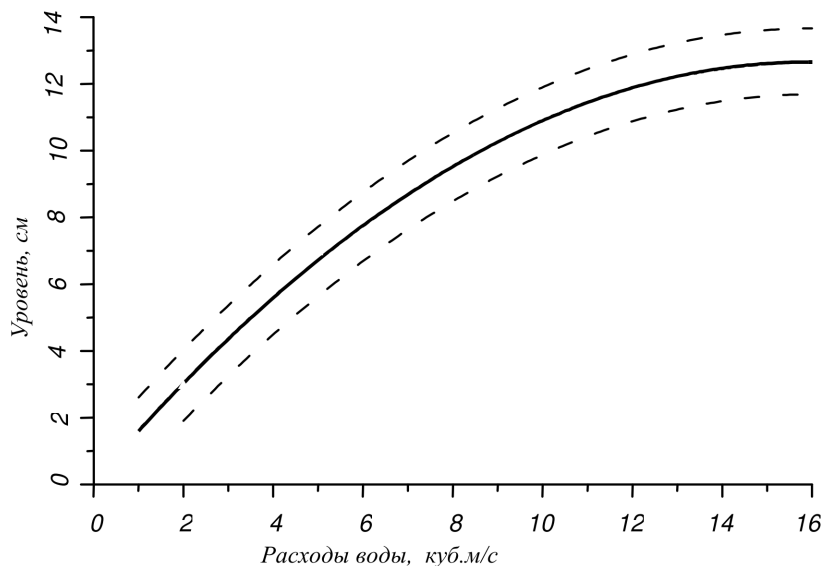


Рис. 3. Кривая связи расходов и уровней воды в нижнем бьефе

При определении напоров ГЭС пользуются средней кривой. Для оценки пропускной способности водоспуска или степени подтопления водосброса (при плотинах небольшой высоты), а также при определении незатопляемых отметок в нижнем бьефе из осторожности принимают верхнюю кривую. По той же причине для расчетов, связанных с определением условий затопления гидравлического прыжка в нижнем бьефе, следует пользоваться нижней огибающей, так как при недостаточном затоплении возникает опасность размыва дна ниже плотины, с чем нужно считаться при разработке порядка открытия водопропускных отверстий и затворов.

При быстро изменяющихся расходах воды появляется нестационарный, неустановившийся режим, и однозначность связи между расходами и уровнями исчезает.

Следует отметить, что если меженное русло сложено из рыхлого и легко размываемого грунта, то в результате русловых процессов на большом протяжении ниже плотины кривые расходов (главным образом их нижняя часть) в течение нескольких десятилетий будут ежегодно занимать на графике все более низкое положение относительно предыдущих лет, т. е. смещаться вниз. Это обстоятельство учитывается, когда назначается отметка порога шлюза, при проверке высоты всасывания в турбинах ГЭС и в других случаях.

Гидравлические характеристики водосбросных и водопроводящих сооружений определяют собой условия отвода воды из верхнего бьефа. Расход воды, отводимой в какой-либо момент времени из водоема, определяется:

- а) размерами и высотным положением водоприемных и водосбросных отверстий;
- б) степенью открытия их затворов;
- в) уровнем верхнего бьефа (уровень нижнего бьефа соответствует перечисленным факторам и определяется по описанной выше кривой расходов).

1.2.2. Характерные уровни и объемы

Последовательное чередование расходования запасов водохранилища и их восполнение в процессе полного удовлетворения водопользования при условии соблюдения разнообразных хозяйственных ограничительных требований отражает режим работы водохранилища. В этом процессе под влиянием гидрологических условий и хода потребления воды во времени происходит последовательная то сработка, то наполнение водохранилища.

К разнообразным хозяйственным и ограничительным требованиям относятся условия водопользования и при избытке стока, и в случае его недостатка – перебоев (т. е. за пределами расчетной обеспеченности), а также различные ограничения как по предельным (максимальным и минимальным) уровням верхнего бьефа, так и по уровням или расходам нижнего бьефа.

В верхнем бьефе пределами колебания горизонтов могут быть:

- допустимое затопление земель, отметки различных сооружений и т. п. (при повышении уровней воды);
- расположение водозаборных устройств, судоходные условия в пределах подпора и пр. (при понижении уровней).

В нижнем бьефе пределы колебания расходов или уровней воды нередко диктуются особенностями гидротехнических устройств, расположением промышленных предприятий и населенных пунктов, а также различных сооружений (отметки мостов и размеры их отверстий, заложение водоприемников, пропускная способность водоспусков или турбин и т. п.), условиями судоходства.

Обычно объем водохранилища определяется результатом сложного водохозяйственного расчета, который устанавливает составные части емкости водохранилища – его полезный и мертвый объемы. Важно, что для пропуска половодий и паводков, в том числе и редкой повторяемости, еще при проектировании предусматривается дополнительный объем (форсировка), определяемый гидрологическими и гидравлическими расчетами с учетом водохозяйственных условий и особенностей топографических характеристик чаши водохранилища.

Вышеназванные составные части емкости водохранилища являются опорными для назначения основных величин отметок уровня, которые определяют по кривой объемов.

Остановимся поподробнее на характеристике составных частей объема водохранилища и соответствующих им подпорных отметок.

Мертвый объем ($V_{м.о.}$) – не срабатываемая в нормальных условиях эксплуатации часть емкости водохранилища, ограниченная сверху горизонтом мертвого объема (ГМО). Мертвый объем при этом не участвует в регулировании стока, но имеет большое практическое значение. Величина $V_{м.о.}$ определяется главным образом расчетами заиления водохранилища, а также санитарно-техническими требованиями и другими водохозяйственными соображениями в зависимости от поставленных задач.

Учитывая будущие изменяющиеся условия работы подпорных сооружений (рис. 4), нередко предусматривают разделение мертвого объема на две части. Верхняя его часть при необходимости может быть в дальнейшем сработана или опорожнена (что

и предусматривается заложением специальных водовыпускных отверстий в теле плотины). Нижняя часть, ограниченная сверху уровнем дна водоспуска, не может быть ни сработана, ни опорожнена (рис. 4).

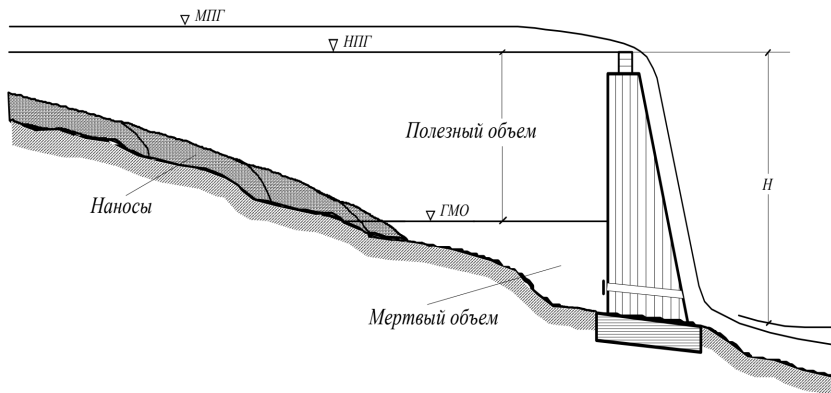


Рис. 4. Схема продольного профиля водохранилища

Частота случаев сработки водохранилища до ГМО зависит от степени регулирования и режима речного стока. При регулировании стока только в пределах года сработка до ГМО или до близких к нему уровней бывает часто, почти ежегодно. При регулировании, охватывающем целый период маловодных лет, сработка до ГМО происходит только в конце таких периодов, т. е. весьма редко.

Рабочий, или полезный, объем – это используемая для регулирования стока часть емкости водохранилища, которая расположена над ГМО и ограничивается сверху нормальным подпорным горизонтом. Таким образом, НПГ – это тот наивысший уровень, который может длительно поддерживаться подпорными сооружениями. Применительно к НПГ обычно производятся основные расчеты устойчивости сооружений и предусматриваются соответствующие запасы их надежности.

Для водосливной плотины, как правило, за НПГ принимается отметка ее гребня. При наличии в теле плотины водосбросных отверстий НПГ соответствует наиболее высокому уровню, кото-

рый может длительно поддерживаться при закрытых затворах. Достижение водохранилищем НПП зависит от тех же причин, что и его сработка. Значение НПП может наблюдаться ежегодно в половодье или же через каждые несколько лет, т. е. довольно часто. Длительность стояния НПП колеблется от 0,5–1 до 4–6 месяцев и более, т. е. до наступления низких расходов ближайшей межени.

Полный объем водохранилища соответствует отметке НПП. Он равен сумме полезного V_n и мертвого $V_{м.о}$ объемов.

Объем форсировки – это временно заполняемая часть емкости водохранилища, которая используется для размещения в ней определенной доли объемов наблюдающихся половодий и паводков с целью уменьшения водосбросных сооружений. После спада проходящих через водохранилище высоких вод емкость форсировки всегда остается опорожненной. Объем форсировки размещается над НПП и ограничивается двумя расчетными горизонтами водохранилища, из которых один (более низкий) называется максимальным подпорным горизонтом (МПП), а другой, над ним (предельный допустимый, или поверочный) – катастрофическим подпорным горизонтом (КПП). При наличии на плотине водосбросов с пониженным порогом емкость форсировки используется не только непродолжительно, но и достаточно редко. Форсированные уровни соответствуют вероятности их появления.

В некоторых случаях срезка (пропуск и трансформация) высоких половодий и паводков с помощью водохранилища рассматривается как специальная задача борьбы с наводнениями. В практике встречаются и другие характерные уровни и наполнения, соответствующие методическим условиям регулирования (сезонный, диспетчерский и многолетний объемы) или специфическим особенностям установки (минимальный летний горизонт для ГРЭС, уровень наибольшей навигационной сработки и т. п.).

Совершенно очевидно, что характерные объемы и уровни взаимно связаны между собой. Так, например, выбирая местоположение и отметку НПП, мы тем самым устанавливаем полный объем водохранилища и максимальный напор для ГЭС. Назначая отметку ГМО, мы одновременно определяем глубину сработки, полезную емкость и зависящие от этих величин водохозяйственные параметры: мощность ГЭС, количество воды, отпускаемой потребителю, а также многое другое.

Все сооружения гидроузла и размеры водохранилища должны быть экономически и технически обоснованы. Капиталовложения по гидросооружениям и по сопутствующим мероприятиям (обвалование, дренаж и т. п.), характеристики и показатели затопления земель и построек, эксплуатационные издержки по гидроузлу и связанным с ним устройствам в сопоставлении с народнохозяйственным эффектом регулирования стока рассматриваются по вариантам регулирования. В свою очередь варианты служат основой для выбора оптимальных размеров водохранилища. Расчеты для выбора параметров водохранилища выполняются в следующем порядке:

а) для уже намеченного створа гидроузла назначаются различные варианты НПГ, в том числе включающие и НПГ, который окончательно будет принят;

б) для каждого из вариантов НПГ в случаях использования подпора для ГЭС назначается и несколько соответствующих вариантов ГМО, т. е. глубины сработки водохранилища. На основании этих вариантов затем выполняются водохозяйственные расчеты и технико-экономическое обоснование наиболее целесообразного ГМО;

в) производится тщательное технико-экономическое сравнение вариантов НПГ при целесообразных ГМО, на основе чего окончательно выбираются отметки НПГ и ГМО.

Следует иметь в виду, что для водохранилищ ГЭС граница сработки назначается ниже НПГ на 20–30% максимального напора, что примерно соответствует нормальной работе турбин, и это значение принимается на начальных стадиях проектирования.

По водохранилищам неэнергетического назначения работы, указанные в п. «б», очевидно, проводить не требуется.

Из названных характерных уровней водохранилища достаточно жестко закрепляется НПГ, особенно для водосливной плотины, не имеющей затворов. Другие промежуточные и тоже характерные уровни не следует принимать строго отвечающими режиму работы водохранилища по условиям водохозяйственных расчетов.

С течением определенного промежутка времени могут изменяться режим работы и функции отдельных водохранилищ. Сооружения должны допускать необходимую гибкость эксплуата-

ции установок в перспективе. Основные их размеры и связанные с ними характерные уровни (например, самые низкие горизонты сработки, навигационные уровни и др.) должны назначаться в нормативном порядке. При этом учитываются проектные результаты водохозяйственного режима и оцениваемые по ожидаемым соображениям возможные отклонения от него, а также и последующие (за пределами сроков планирования) изменения условий водопотребления.

Размеры водохранилища должны удовлетворять общим гидротехническим требованиям, а также следующим условиям водного хозяйства:

1. Кроме основного назначения проектируемого водохранилища (например, для водоснабжения населенных пунктов или для целей энергетики), непременно должны быть рассмотрены и обоснованы возможности комплексного удовлетворения водой смежных отраслей водного хозяйства (водоснабжение промышленных предприятий, орошение, рыбозапасоводство, водный транспорт и т. п.). При этом установленное водопотребление должно удовлетворяться в полном объеме с заданной обеспеченностью.

2. Объем водохранилища не должен быть чрезмерным (не более, например, двух объемов среднегодового стока). В противном случае оно длительное время может оставаться незаполненным, не обеспечивающим водоснабжения в пусковой период установки, который при этом получается очень затяжным. В подобных условиях наиболее важное значение имеет заблаговременность строительства водохранилища, а также согласованный план постепенного подключения к нему водопользователей и наращивания водопотребления до проектных значений в пусковой период. Данное ограничение объема водохранилища следует понимать так, что при большой изменчивости годового стока (например, на Дальнем Востоке, в Забайкалье и других районах) водопотребление вместе с потерями практически не может превышать 50–60% среднего годового стока.

3. Средняя глубина водохранилища при отметке НПГ должна быть в засушливых районах не менее 4,0 – 5,0 м. При меньших глубинах регулирование стока становится малоэффективным в связи со значительным прогревом воды и большими ее потерями на испарение. При часто наблюдающихся (летом) наполнении

ях водохранилища не должно образовываться значительных мелководных площадей с глубинами менее 2,0 м (по санитарно-техническим условиям, из-за больших потерь на испарение и т. п.). В ряде случаев целесообразно даже ограждение мелководий дамбами (их обвалование).

4. Мероприятия по регулированию стока, как правило, существенно изменяют качество воды. Поскольку при различной зарегулированности морфометрические характеристики водохранилища изменяются значительно, то в засушливых районах с большим испарением НПП и прочие показатели водохранилища могут быть ограничены требуемыми нормативами качества воды.

В целом же водохранилище должно вполне удовлетворять специфическим особенностям основного, наиболее главного водопользователя. Для ГЭС, например, это ограниченная высота сливной призмы водохранилища; для целей орошения – лимитирующие отметки командования поливными площадями; для охлаждающих водохранилищ, принадлежащих ГРЭС – наличие необходимой охлаждающей площади зеркала и обеспечение средней глубины (не менее 2,0–2,5 м, несколько выше ГМО) в пределах летней зоны циркуляции, определяемой обычно по последнему году сработки водохранилища.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение водохозяйственной установки.
2. Как соотносится естественный режим речного стока с режимом водопотребления?
3. От чего зависят основные параметры водохозяйственной установки?
4. Назовите основные водохозяйственные задачи, которые возникают при проектировании.
5. Каким режимом определяются условия работы установки?
6. Какими графиками изображаются расходы, уровни, напоры и другие режимные характеристики в водохозяйственных расчетах? Как называются эти графики?

7. Охарактеризуйте каждый из графиков.
8. Охарактеризуйте типы и виды водохранилищ.
9. Назовите известные емкостные и гидравлические характеристики водохранилищ.
10. Какие морфометрические характеристики водохранилищ используются при проектировании?
11. Какая из зависимостей является исходной для характеристики чаши водохранилища?
12. Охарактеризуйте принципы построения графика морфометрических характеристик водохранилища.
13. Определите статическую и динамическую кривые объемов.
14. В чем заключается физическая сущность кривой расходов нижнего бьефа?
15. Охарактеризуйте мертвый объем водохранилища и его основное назначение.
16. Охарактеризуйте рабочий, или полезный, объем водохранилища и его основное назначение.
17. Охарактеризуйте объем форсировки водохранилища и его основное назначение.
18. Охарактеризуйте рабочий объем водохранилища и его основное назначение.
19. Нарисуйте схематический профиль водохранилища и отметьте на нем важнейшие горизонты.
20. Каким условиям должны удовлетворять основные размеры водохранилища? Охарактеризуйте каждое условие.

Глава 2

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ В РАСЧЕТАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

Исходными данными водохозяйственного проектирования являются разнообразные материалы полевых гидрологических наблюдений, в том числе кадастровые данные стационарной сети постов, а также топографические съемки местности, где намечается создание водохранилища. Кроме этого, к исходным данным относятся материалы климатических наблюдений и общие характеристики геологических и гидрогеологических условий района будущих сооружений и водохранилища.

2.1. Гидрометеорологические данные

Основным источником информации по гидрологическому режиму водотоков являются материалы непосредственных наблюдений государственного учета вод. К указанным материалам следует отнести данные водомерных наблюдений, измерений расходов воды, твердого стока (взвешенных и донных наносов), гранулометрического состава наносов, ледово-термического режима, химического, бактериологического состава воды.

При проектировании водохозяйственной установки перечисленные гидрологические материалы используются по пунктам наблюдений (гидрологическим постам), расположенным в пределах верхнего бьефа на протяжении (расстоянии) влияния подпора, а в пределах нижнего бьефа – на протяжении влияния регулирования стока.

В проекте каскадно расположенных водохозяйственных установок гидрологические данные используются по пунктам наблюдений, расположенным в пределах всего рассматриваемого протяжения реки: от места выклинивания подпора самой верхней ступени до нижней границы зоны влияния регулирования стока в нижнем бьефе нижней ступени.

Степень подробности изучения и разработки отдельных гидрологических вопросов зависит не только от наличия имеющих-

ся наблюдений в рассматриваемом бассейне и от стадий проектирования, но также и от решаемых будущей водохозяйственной установкой задач. Длительные и всесторонние наблюдения дают возможность надежно составить подробную, обоснованную и всестороннюю гидрологическую характеристику и определить условия, обеспечивающие необходимую полноту и точность водохозяйственного проектирования. Непродолжительные же наблюдения, не охватывающие всех элементов режима водного объекта, не обеспечивают требуемой полноты, а также точности обоснования проекта.

Хорошо изученными в гидрологическом отношении водотоками обычно являются крупные реки, расположенные в хорошо освоенных районах страны. Для малых, а иногда и для средних водотоков обычным является недостаточность или даже полное отсутствие данных натурных гидрологических наблюдений. В этом случае приходится восполнять пробелы в ряду данных существующими косвенными методами и путями.

Однако и при наличии длительных рядов наблюдений было бы не совсем правильно ограничиться только ими и не использовать дополнительные возможности, которые представляются всей совокупностью имеющихся по району гидрологических и метеорологических материалов. Изучение этих материалов будет способствовать, например, правильной оценке повторяемости максимумов расходов, если в рассматриваемом районе зарегистрированы случаи с исключительно высокими половодьями и паводками, или повторяемости маловодий, если зарегистрированы случаи катастрофического уменьшения стока.

На начальных стадиях проектирования (например, при составлении схемы использования водотока) водохозяйственные расчеты можно проводить на предварительной подборке и обработке данных гидрологических материалов с неполным охватом и учетом всех элементов гидрологического режима реки. Водохозяйственные расчеты для последующих стадий проектирования должны основываться уже на детальной обработке материалов наблюдений с полным охватом (по возможности) всех элементов режима водотока. Разумеется, что при этом более подробно прорабатываются именно те вопросы гидрологического режима, которые связаны с решаемыми водохозяйственной

установкой задачами. В частности, если установка будет осуществлять регулирование паводочного стока, то в гидрологической записке очень подробно освещаются вопросы максимальных расходов воды, в том числе и редкой повторяемости, объемов паводков и формы их гидрографов. Если водоток транспортирует большое количество наносов, обуславливающих заилиение водоема, то в таком случае очень подробно освещаются вопросы твердого стока: мутность, расходы взвешенных наносов, гранулометрический состав наносов и др.

В общем случае наименьшая длительность (длина) ряда гидрологических наблюдений, которая достаточна для гидрологического обоснования проекта водохозяйственной установки, определяется двумя основными положениями: степенью регулирования стока и репрезентативностью ряда. Для обоснования проекта установки, осуществляющей сезонное регулирование стока, обычно достаточно иметь ряд наблюдений 15–20 лет, если в его состав входят характерные по водности и по внутригодовому распределению стока годы, а также годы средней водности или близкие к норме. Понятно, что для обоснования проекта установки, осуществляющей многолетнее регулирование стока, такая длительность ряда совершенно недостаточна. В процессе выполнения необходимых расчетов стока оптимальная длина используемых рядов наблюдений должна быть уточнена по действующим СНиП.

При недостаточной длительности гидрологического ряда в задачу расчетов входит первоначальное решение вопроса по его удлинению и затем последующее определение статистических параметров стока путем приводки их к длительному многолетнему периоду. Удлинение ряда и уточнение необходимых параметров обычно производится по их связи со стоком реки-аналога или с репрезентативными метеорологическими данными, а также по другим известным путям, рекомендуемым действующими СНиП. При полном отсутствии наблюдений или при малой их длительности нередко прибегают к построению искусственного ряда способом, заключающимся в принятии на восстанавливаемой реке такой же последовательности годовых колебаний значений обеспеченности стока, как и на выбранной реке-аналоге.

Вместе с тем при осуществлении водохозяйственной установкой сезонного или неглубокого многолетнего регулирования стока, когда для обоснования проекта водного хозяйства вполне достаточен период ограниченной длительности, при наличии длинного ряда гидрологических наблюдений из него выбирается оптимальный расчетный период, по которому и производятся водохозяйственные расчеты.

2.2. Материалы гидрологической записки

Конечным результатом обработки, расчетов и анализа гидрологических и метеорологических материалов должна быть гидрологическая записка (очерк), входящая в состав любого проекта водохозяйственного мероприятия. Гидрологическая записка должна освещать следующие гидрометеорологические разделы и сведения:

1. Физико-географические условия. В этом разделе дается подробное описание физико-географических условий бассейна, гидрографической сети, особенностей и условий питания, степени использования рассматриваемого водного объекта и влияния этого использования на его режим. Дается описание метеорологической изученности, и на основе данных наблюдений приводятся основные климатические характеристики. В районах с развитой ливневой деятельностью необходимо охарактеризовать ливни и их влияние на режим изучаемого объекта выше и ниже впадения основных притоков, а также на режим притоков между створами сооружений. Характеристика испарения с водной поверхности дается на основе непосредственных наблюдений или по данным расчетов.

2. Гидрологическая изученность. Здесь приводится подробное описание проведенных в бассейне всех видов наблюдений над уровнями, расходами жидкого и твердого стока, зимнего и термического режима и т. д. с указанием продолжительности рядов наблюдений. Анализируется и устанавливается дата и период переноса гидрологических наблюдений в другие пункты, определяются необходимые поправки для приведения показаний уровней воды к общему нулю. «Отметки нулей графиков водомерных» постов даются в единой системе высот (желательно

в Балтийской), приводится оценка полноты и качества гидрологических материалов.

3. Характеристика уровня режима. В этом разделе отмечаются особенности уровня режима за отдельные сезоны года под влиянием различных факторов, а также и за характерные годы. Кроме этого, рассматривается интенсивность нарастания и спада уровней в половодья и паводки, указываются максимальные и минимальные уровни, амплитуда изменения уровней в пределах года и за многолетний период, соотношение между максимальными срочными и средними суточными уровнями и т. д.

4. Сток за период наблюдений. Излагается принятая методика подсчета стока воды. Приводится характеристика измеренных расходов при открытом русле, обоснованность связей расходов и уровней измерениями, устойчивость этих связей, способы экстраполяции связей расходов и уровней за пределы измеренных расходов, излагаются методы подсчета стока за период открытого русла. Дается характеристика измеренных расходов при наличии ледового покрова, освещается способ подсчета стока при ледоставе и в переходные периоды. В этом же разделе приводятся кривые связи расходов и уровней не только в створах сооружений, но и в других расчетных створах, устанавливаемые путем проведения водохозяйственных и гидравлических расчетов к проекту. Поясняется способ построения указанных связей.

5. Основные характеристики стока. Приводится характеристика стока за период фактических наблюдений: колебаний суточных, месячных и годовых значений расходов, внутригодового распределения стока. Критически оценивается достаточность наблюдений для установления параметров стока, восполняются пропуски, удлиняется ряд. Устанавливаются статистические параметры стока: норма и коэффициенты изменчивости, асимметрии. Представляется характеристика экстремальных значений годового стока и сопровождающей его гидрометеорологической обстановки. Отмечаются аномалии в ходе стока – длительность и степень отклонения от нормы маловодий и многоводий. Приводится величина модуля среднеегодового стока в целом по всему водосбору и по отдельным его частям.

Дается характеристика максимальных расходов воды. Их расчетные величины определяются в соответствии с указаниями СНиП

применительно к средним суточным и мгновенным (или по срочным наблюдениям) значениям. Генетически различные паводки (снеговые и дождевые) выделяются в отдельные группы. Паводки ливневого происхождения, если они наблюдаются в течение длительного периода года и если есть к этому основания, разбиваются на паводки различной интенсивности по отдельным срокам.

Если на водохозяйственную установку возлагается также задача регулирования половодий или паводков, то большое значение имеет объем стока за паводок и форма его гидрографа. В таких случаях необходимо тщательно анализировать вопрос об объеме половодий и паводков и форме гидрографов за период имеющихся наблюдений. Для этого отбираются типичные формы, которые принимаются для реки за модель гидрографов расчетных половодий или паводков. При сложных и разнообразных формах гидрографов в качестве модели принимается не один, а два и более характерных гидрографов. Далее с привлечением фактических данных анализируется и устанавливается наличие или отсутствие возможности совпадения пика и объема паводка одинаковой вероятности превышения, что затем учитывается при построении расчетных гидрографов стока. Технология определения расчетных паводков и гидрографов выходит за рамки настоящего учебного пособия и излагается в других курсах.

Выше рассмотрены требования к построению расчетных гидрографов применительно к задаче проектирования отдельной водохозяйственной установки или самой верхней установки каскада. При проектировании совместно работающих установок каскада необходимо дополнительно строить расчетные гидрографы паводков промежуточных площадей водосбора – между створами верхней и нижней ступеней каскада. При этом расчетные гидрографы в основных створах и с промежуточных площадей водосбора совмещаются на одном чертеже с соблюдением фактических календарных сроков прохождения паводочных волн с различных частей водосбора.

Также дается характеристика минимального стока, отдельно летнего и отдельно зимнего, сроков наступления и продолжительности стояния наименьших расходов. Устанавливаются параметры кривой распределения минимальных расходов и определяются расчетные значения этих расходов требуемой обеспеченности.

6. *Термический режим.* Сведения о температурах воды и ее изменении приводятся по месяцам за характерные годы: жаркий, холодный, средний. Сообщаются сроки появления осенью в отдельных пунктах водотока первых ледовых явлений, время наступления устойчивого ледостава, длительность и мощность ледохода, толщина ледового покрова и изменение ее в течение зимы, зависимость толщины льда от гидрометеорологической обстановки. Кроме этого, описываются места образования шуги, степень зашугованности русла, а также зажоры и их влияние на уровни реки. При необходимости указываются значения применяющихся при подсчете стока зимних коэффициентов, их изменение во времени и по длине реки. Отдельно по длине реки даются сведения о первых подвижках льда, начале весеннего ледохода, его длительности, мощности и характере. Также характеризуются заторные явления, места и причины их образования, высота подъема уровней во время заторов, длина распространения заторных уровней, наличие связи высоты подъема уровней при заторах с расходами, процесс прорыва заторов.

7. *Сток наносов.* Подробно характеризуется мутность воды, зависимость ее от расходов, изменение мутности по времени, ширине, глубине и длине потока. Указываются причины больших значений мутности. Кроме этих данных, приводится распределение количества взвешенных наносов по месяцам, годам и в среднем за многолетний период. Указывается гранулометрический состав взвешенных наносов: средний, мелкий, крупный. Приводятся сведения по донным наносам, их количеству и составу. Описывается характер деформаций русла в отдельных местах и по длине потока.

8. *Химический состав воды.* Дается характеристика химического и бактериологического состава воды, ее загрязненности, агрессивных свойств, пригодности воды для питьевых, хозяйственно-бытовых и промышленных целей.

Приведенные в гидрологической записке данные перерабатываются затем в форму, удобную для выполнения водохозяйственных расчетов. В частности, сводная ведомость о средних месячных и средних годовых расходах пересоставляется и дается за водохозяйственные годы (вместо календарных лет), как это обычно принимается при гидрологических расчетах. За начало

водохозяйственного года берется граница смены низкого стока на высокий, т. е. конец зимней межени – начало половодья. Практический смысл подобного искусственного подхода заключается в том, что в пределах такого года замыкается определенный этап работы водохранилища: наполнение и его сработка.

Чаще всего расчеты ведутся по средним месячным расходам воды, поэтому граница водохозяйственного года совмещается с началом первого месяца высокого стока – половодья. Совершенно очевидно, что ежегодно время наступления половодья календарно не совпадает, но тем не менее границу года следует жестко закреплять, ориентируя ее на более раннее начало половодья. В таком случае надежно исключается неизбежное искажение стока воды предшествующей межени высокими расходами начавшегося раннего половодья, если принимать за начало года среднее или позднее его наступление.

Обычно основные стоковые характеристики – средние месячные и средние годовые расходы – представляют удобной для использования таблицей, имеющей следующий вид (табл. 2).

Таблица 2

Средние и характерные расходы воды

Год	Средние месячные расходы воды, куб. м/с												Средний годовой расход, куб. м/с
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
1972-73	145	1061	203	85	121	108	212	91	50	45	47	51	185
1973-74	431	1028	105	68	41	38	41	39	39	42	43	53	164
1974-75	222	728	94	97	266	130	193	111	68	60	56	55	173
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Средн.	200	1320	502	195	149	167	279	206	109	77	65	64	278
Наиб.	307	1240	307	120	345	170	290	390	200	125	110	90	380
Наим.	124	980	76	55	32	23	37	28	27	35	32	43	78

Представление данных о расходах воды в форме таблиц облегчает анализ и выявление особенностей гидрологического режима водотока, а также вычисление стока и его параметров за характерные периоды и сезоны года, используемые в дальнейших водохозяйственных расчетах.

На реках Дальнего Востока, где повышенный сток обуславливается в основном выпадением летних муссонных дождей и ливней, начало половодья приурочивается к июню–июлю. На реках европейской территории половодье в большинстве случаев начинается в апреле, в южной части этой территории – в марте, северной – в мае. В соответствии с этим за начало водохозяйственного года принимается июнь–июль или март–апрель–май и т. п.

2.3. Топографические характеристики водохранилища

Главной топографической характеристикой водохранилища являются кривые зависимости площадей зеркала и объемов от отметки подпорного уровня (наполнения водохранилища).

Площади зеркала водохранилища при тех или иных положениях уровня определяются путем планиметрирования на планах съемки площадей, ограниченных контурами горизонталей и линией продольной оси подпорного сооружения, замыкающей горизонтали обоих берегов (рис. 5).

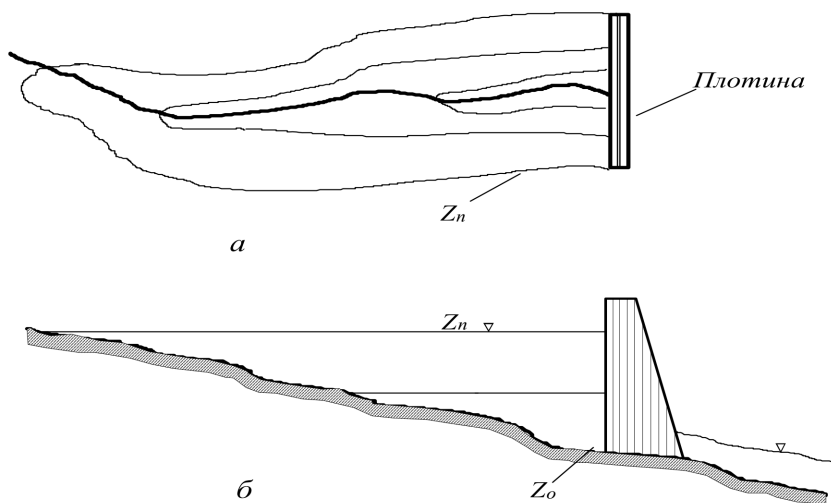


Рис. 5. План (а) и продольный профиль водохранилища (б)

Для расчета и построения графиков на рассматриваемые характеристики необходимо иметь подробные топографические материалы крупномасштабной планово-высотной съемки территории будущих затоплений, представленных в виде планов местности с нанесенными на них горизонталями.

Чтобы выполнить построение зависимости площадей зеркала от отметок уровней, следует первоначально по плану водохранилища путем планиметрирования площадей зеркала при всех горизонталях получить соответствующие им значения площадей. Площади измеряются в пределах горизонталей от самой низкой (у дна) при Z_0 до наиболее высокой горизонтали при Z_n , т. е. до которой возможен подпор при эксплуатации водохранилища.

Топографические характеристики водохранилища, полученные на основе мелкомасштабных съемок, должны рассматриваться как приближенные и могут использоваться только на предварительных стадиях проектирования. Впоследствии их следует уточнять по детальным съемкам более крупного масштаба.

2.4. Топографические характеристики участка реки

Нередко на начальных или предварительных стадиях проектирования для значительного протяжения водотока, в пределах которого намечается строительство ряда гидросооружений, возникает необходимость выполнять построение топографических характеристик, подобных рассмотренным выше. Цель таких построений – облегчить предварительное размещение подпорных сооружений по длине водотока и дать возможность, не проводя планиметрирования, построить для отдельных водохранилищ кривые $F = f(Z)$ и $V = f(Z)$ при размещении сооружений в любых створах.

Для построения указанных графиков поступают следующим образом. Исследуемое протяжение реки делится сечениями, нормальными к горизонталям, на небольшие участки с возможно однообразной шириной долины (рис. 6).

Начальное сечение, от которого ведется счет, проводится через точку с отметкой дна, равной наиболее высокой горизонтали Z_n .

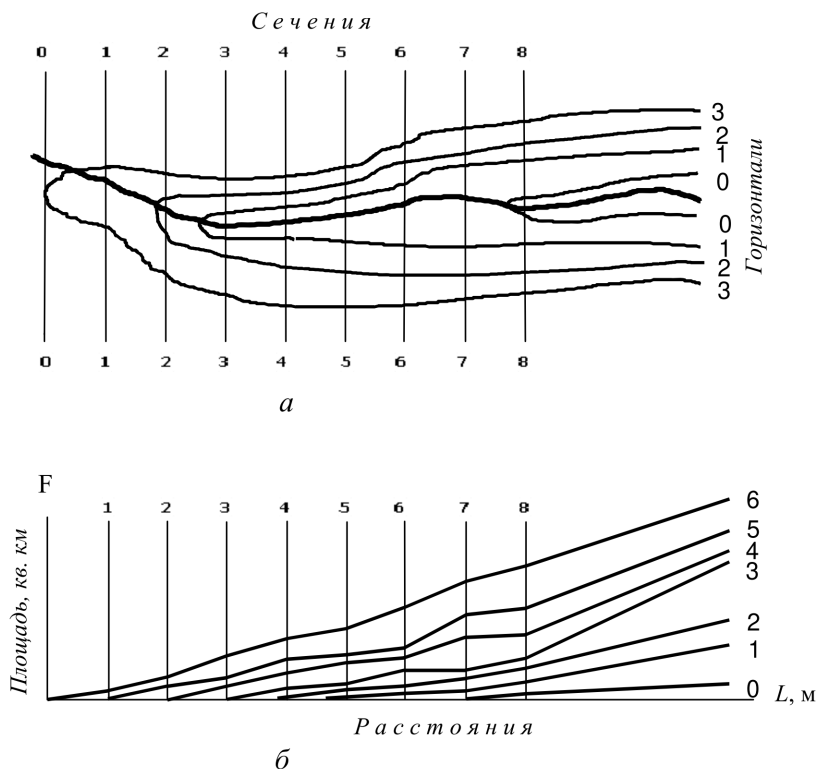


Рис. 6. Топографические характеристики участка реки:
 а – план; б – график нарастания площадей зеркала на участке водотока

Последнее сечение размещается в нижнем конце рассматриваемого протяжения (рис. 6). Для каждого участка определяем планиметрированием площади, замыкаемые горизонталями и границами участков. Последовательно суммируя (вниз по течению) площади по участкам при одноименных горизонталях, получим интегральные величины площадей зеркала до замыкающего сечения. Построенные по этим данным графики будут характеризовать нарастание площадей зеркала вдоль водотока при различных высотных отметках.

От этих характеристик нетрудно перейти к подобным объемным параметрам. Для этого достаточно воспользоваться следующим простым соотношением:

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

где ΔV – частный объем водохранилища между горизонталями Z_i и Z_{i+1} ; F_i и F_{i+1} – площади зеркала водохранилища при отметках Z_i и Z_{i+1} ; ΔZ – сечение между горизонталями.

Построенные таким путем топографические характеристики обладают следующими основными свойствами:

1. По их значениям можно построить необходимые зависимости $F = f(Z)$ и $V = f(Z)$ для любого намечаемого водохранилища в пределах исследуемого протяжения водотока. Для этого нужно разрезать графики сечением, расположенным в месте проектируемой постройки подпорного сооружения, и прочитать на шкале соответствующие величины F и V при интересующих нас значениях Z .

2. Тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс (шкале длины) a выражает для сечения, соответствующего точке касания:

а) по графику площадей зеркала – ширину сечения поверху на соответствующей отметке:

$$\operatorname{tg} a_1 = dF/dL = B;$$

б) по графику объемов – площадь живого сечения при соответствующей отметке:

$$\operatorname{tg} a_2 = dV/dL = \omega.$$

Таким образом, по наклону линий на графике площадей зеркала и объемов можно судить о ширине и площади живого сечения: узкому сечению и малой его площади отвечают малые наклоны линий на графике, и наоборот – широкому сечению и большой его площади – крутые наклоны линий. Сжатые (узкие) сечения являются наиболее выгодными (с топографической точки зрения) для постройки подпорного сооружения.

2.5. Прочие материалы

К прочим относятся материалы метеорологических наблюдений и данные о геологических и гидрогеологических условиях района сооружений и водохранилища.

Метеорологические наблюдения необходимы для расчета величины испарения, расчета ветровых сгонно-нагонных явлений, волнения на водохранилище, зимнего и термического режима верхнего и нижнего бьефов.

Геологические и гидрогеологические материалы необходимы для определения фильтрационных потерь из водохранилища и перестроения береговой линии, деформации берегов, русла и т. д.

Контрольные вопросы

1. Какие материалы называются исходными для целей водохозяйственного проектирования?

2. По каким пунктам наблюдений и какие гидрологические материалы применяются в проектировании установок (перечислите основные)?

3. Какими основными положениями определяется минимальная длительность периода гидрологических наблюдений для обоснования проекта?

4. По каким направлениям решается задача расчетов при недостаточной длительности ряда наблюдений?

5. В каком разделе проекта размещаются результаты обработки, обобщения исходных материалов наблюдений, какие разделы он включает в себя?

6. Какими наиважнейшими параметрами, необходимыми для расчетов регулирования, характеризуется сток?

7. Дайте характеристику подхода и принципа определения топографических параметров участка реки.

8. Какие зависимости можно построить по параметрам топографических характеристик реки?

9. Что выражает тангенс угла наклона к оси абсцисс на графике площадей и на графике объемов участка реки?

10. Какие сечения предпочтительнее для выбора местоположения подпорных сооружений при проведении работ по определению топографических характеристик участка реки?

11. В чем заключается отличие водохозяйственного года от календарного?

12. В чем заключается практический смысл применения водохозяйственного года?

Глава 3 РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

3.1. Основные положения теории регулирования стока

Необходимость регулирования речного стока возникает в случаях, когда естественный гидрологический режим реки не отвечает режиму водопользования и водопотребления. Регулирование речного стока осуществляется с помощью водохранилищ, которые задерживают речной сток для последующего его использования, тем самым изменяя естественный режим водотока для наиболее рационального использования водных ресурсов в интересах народного хозяйства.

Регулированием стока решаются две основные задачи:

1. Повышение низких расходов воды для надежного водоснабжения населения и промышленности. Такое регулирование является типичным, когда решается задача использования стока, недостаточного в межень и избыточного в половодье и паводки.

2. Понижение высоких расходов. В этот вид регулирования входят задачи устранения наводнений на участке реки ниже гидроузла, а также задачи сокращения размеров и удешевления гидротехнических сооружений, с помощью которых излишки воды сбрасываются вхолостую.

Эти две основные задачи, обычно решаемые одним и тем же водохранилищем, нередко оказываются противоречивыми: не зная заранее величины высокого стока и времени его прохождения, приходится держать водохранилище пустым, а для повышения низкого стока – наполненным. В подобном случае преимущество отдается главному водохозяйственному мероприятию, а второстепенная задача решается частично, но с учетом проектных условий работы установки по основному водохозяйственному плану.

Если второстепенная задача незначительно влияет на экономические показатели решения основной задачи, то оба мероприятия могут решаться в полной мере. Так, например, чтобы регулировать сток с целью защиты народнохозяйственного обь-

екта от затопления, необходимы весьма большие объемы водохранилищ для аккумуляции высокого стока. Поскольку регулирование стока для водоснабжения населенного пункта этого объекта требует сравнительно небольших дополнительных объемов, то обе потребности удовлетворяются в этом конкретном случае полностью.

В некоторых сложных случаях оптимальное решение принимается по результатам анализа вариантов, составленных из комбинаций элементов обеих задач. Вначале рассмотрим вопросы, которые принадлежат первой задаче регулирования стока, т. е. вопросы повышения низких расходов.

Необходимость регулирования стока отчетливо выявляется из сравнения потребных расходов воды и минимальных среднесуточных расходов речного стока за многолетний период. Если первые меньше вторых по тем месяцам года, в которые производится водопотребление, то вопрос о регулировании стока отпадает (в нем совсем нет необходимости) при длительности гидрометрических наблюдений соответственно обеспеченности водопотребления, например: 10–15 лет в случаях орошения и не менее 25–30 лет при водоснабжении.

При наличии многолетних данных о стоке для большей надежности потребный расход следует сравнить с обеспеченным минимальным стоком. По этим данным минимальные суточные и минимальные месячные расходы отдельно для открытого русла и отдельно при ледоставе определяются вероятностным расчетом по параметрам минимумов – их норме, коэффициентам вариации и т. п.

В случае полного отсутствия гидрометрического ряда наблюдений обеспеченные минимумы стока (среднесуточные и среднемесячные) устанавливаются по данным региональных обобщений.

Таким образом, выявив потребность в регулировании стока, находят его продолжительность – опять-таки из сравнения водопотребления и естественного стока в маловодные периоды за сутки, неделю, сезон, год и т. д.

Регулирование стока на повышение низких расходов выполняется путем временного задержания в водохранилище избытков стока над потреблением (в многоводные сезоны или годы), которые затем сбрасываются в маловодье, когда приток меньше потребления.

Возможность приведения режима стока в соответствие с запросами потребителей зависит от величины и режима стока, величины и режима потребления воды и объема самого водохранилища.

3.2. Виды регулирования стока

Среди известных видов регулирования речного стока различают следующие его виды: суточное, недельное, сезонное (или годовое) и многолетнее. Нередко в практике можно также встретить компенсирующее, вторичное (буферное) и непериодическое регулирование стока.

Суточное регулирование заключается в перераспределении по часам суток практически равномерного среднесуточного стока $q_{\text{ср.}}$ соответственно неравномерному водопотреблению. В часы малого потребления вода накапливается в специальном аккумулярующем резервуаре, а в часы пик расходуется из него в соответствии с неравномерностью водопотребления (рис. 7).

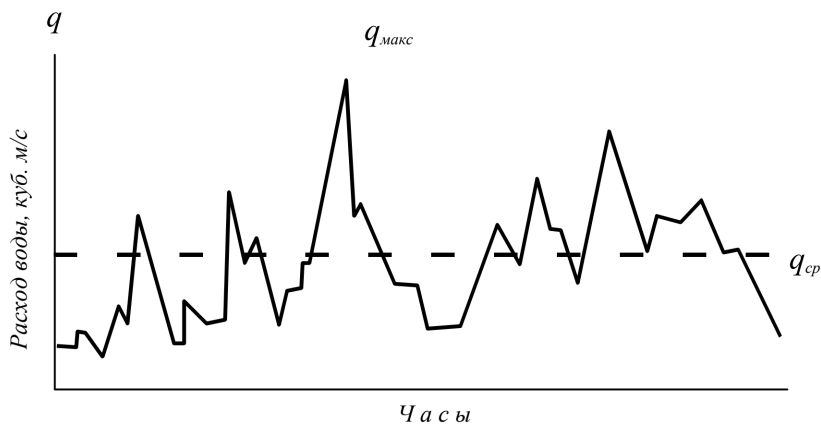


Рис. 7. Схема суточного регулирования стока

Суточное регулирование, в частности, позволяет использовать небольшую пропускную способность водозаборного сооружения, насосной станции и водовода (или канала), которые при этом обеспечивают в необходимом объеме равномерную доставку

воды в бассейн суточного регулирования. Применение такого подхода экономически выгодно. При отсутствии суточного регулирования и предназначенного для этой цели аккумулирующего бассейна пришлось бы все упомянутые сооружения рассчитывать на максимальный часовой расход (рис. 7) и неравномерную подачу воды непосредственно водопотребителям (в водоразборную сеть), что привело бы к существенному удорожанию всей системы. Суточное регулирование, в частности, имеет большое значение в гидроэнергетике для повышения использования мощности ГЭС.

Недельное регулирование низких расходов воды в реке, если они полностью используются, означает перераспределение в течение недели практически равномерного стока соответственно нормальному водопотреблению – в рабочие дни и пониженному водопотреблению – в нерабочие. Снижение водопотребления за 1–2–3 нерабочих дня позволяет при наличии аккумулирующей емкости повысить отпуск воды в рабочие дни (рис. 8).

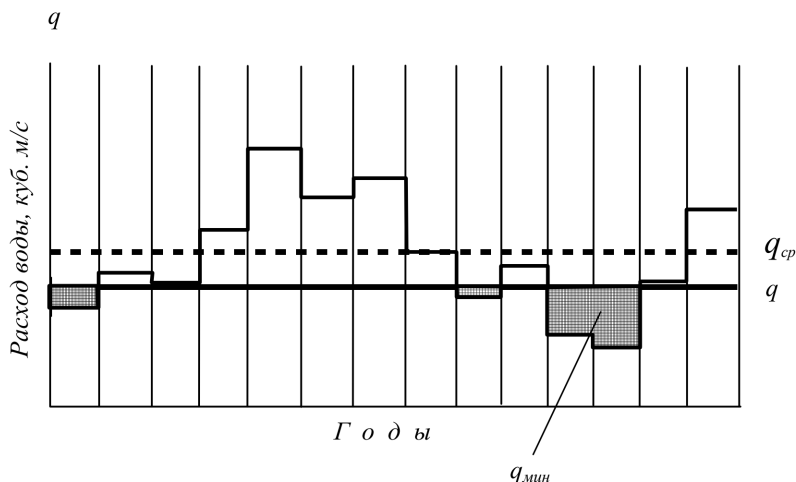


Рис. 8. Схема недельного регулирования стока

Если потребление воды в рабочие дни q_1 , а в нерабочий день q_2 , то при продолжительности недели (декады) n дней, в числе которых имеется k нерабочих дней, общее потребление воды за это время составит

$$[q_1(n-k) + q_2 k] \text{ } 86 \text{ } 400 \text{ куб.м.},$$

а среднее водопотребление (в куб.м/с), равное стоку, можно представить так:

$$q_{cp} = Q = \frac{q_1(n-k) + q_2 k}{n}.$$

Из этой формулы видно, что за счет разницы в нерабочие дни $(q_{cp} - q_2)$ среднесуточный расход в рабочие дни может быть повышен до величины

$$q_1 = q_{cp} + \frac{(q_{cp} - q_2)k}{n-k}.$$

Понятно, что превышение дополнительного объема потребления воды над равномерным стоком в рабочие дни:

$$V_1 = (q_1 - q_{cp})(n-k) \text{ } 86 \text{ } 400 \text{ куб.м.}$$

равно избытку ее в нерабочие дни:

$$V_2 = (q_{cp} - q_2)k \text{ } 86 \text{ } 400 \text{ куб.м.}$$

Подставляя значение q_{cp} в одну из двух последних формул, найдем необходимую емкость недельного регулирования:

$$V = V_1 = V_2 = k(q_1 - q_2) \frac{n-k}{n} \text{ } 86 \text{ } 400 \text{ куб.м.}$$

Сезонное (годовое) регулирование заключается в перераспределении стока из многоводных сезонов на маловодные сезоны. При этом водопотребление каждого года удовлетворяется стоком этого же года. Такое регулирование обусловлено внутригодовой неравномерностью естественного стока и несовпадением его величины по времени с водопотреблением. В тех случаях, когда обеспеченный объем годового стока W_p больше водопотребления брутто (вместе с потерями воды) за год $A_{бр}$ или равен ему ($W_p \geq A_{бр}$), – причем в отдельные периоды года сток меньше водопотребления, – возникает необходимость внутригодового или сезонного регулирования стока до величины необходимого зарегулированного расхода Q . Если таким периодом является вся межень, то этот вид регулирования называют также годовым.

Полное годовое регулирование удовлетворяет получению гарантированного объема водопотребления, равного обеспеченному объему годового стока: $A_{\text{бр}} = W_p$. Если $A_{\text{бр}}$ приближается к W_p , то имеет место глубокое сезонное или неполное годовое регулирование. При этом водохранилище заполняется практически во все годы в пределах заданной обеспеченности [6]. В расчетном году весной имеются сбросы воды, и обеспеченность заполнения водохранилища обычно больше величины обеспеченности потребления. Малые соотношения $A_{\text{бр}}$ к W_p свойственны случаям неглубокого сезонного вида регулирования речного стока.

На рис. 9 показаны гидрографы естественного стока расчетного маловодного года (а) и зарегулированных расходов для простейшего случая равномерного водопотребления (б).

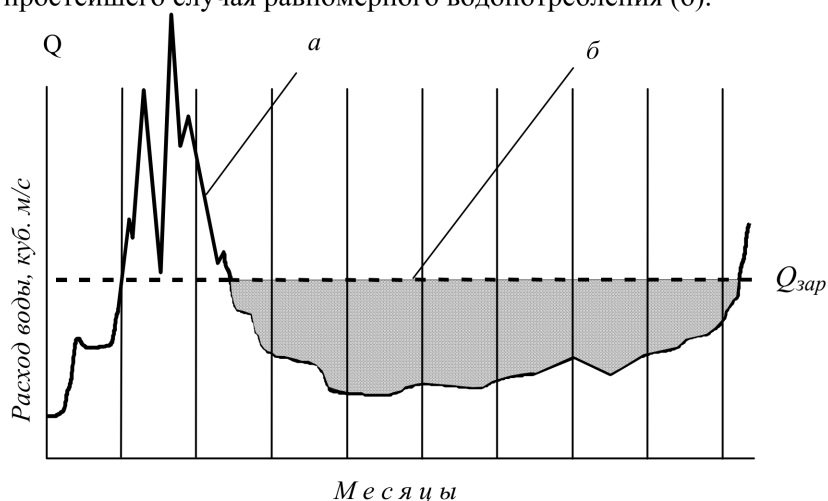


Рис. 9. Схема сезонного регулирования стока:
а — естественные расходы; б — зарегулированные расходы

В период избытков притока воды над потреблением водохранилище наполняется, в периоды недостатков — срабатывается. Его емкость, необходимая для сезонного регулирования, равна дефициту стока (на рис. 9 — заштрихованная площадь), т. е. разности объемов потребления и притока воды за время его нехватки.

В том случае, когда зарегулированный расход меньше среднего расхода расчетного маловодного года, избытки стока пре-

вышают дефицит, и после наполнения водохранилища оставшаяся часть объема стока сбрасывается.

Рассмотренный выше пример представляет собой простой случай однократной работы водохранилища, т. е. оно в течение водохозяйственного года по одному разу наполняется и полностью срабатывается. При сложной форме гидрографа притока (при наличии летне-осенних паводков) водохранилище работает в несколько и более тактов.

В практике встречаются два типа сезонного регулирования.

1. Первый тип относится к случаям, когда $A_{бр} < W_p$. При этом водохранилище ежегодно в половодье наполняется до предела (имеют место сбросы), а в период межени полностью срабатывается. Такова схема регулирования стока небольшим водохранилищем для промышленного и коммунального водоснабжения.

2. При втором типе водохранилище даже значительных размеров, способное справляться с многолетним регулированием, эксплуатируется с полной сработкой к концу периода низкого стока во все годы, в том числе и в весьма многоводные. Например, таковы водохранилища, поддерживающие попусками судоходные глубины. Эти водоемы полностью срабатываются к концу навигации. В весенний период они иногда недостаточно наполняются (соответственно величине стока половодья) и поэтому имеют переменную по годам отдачу.

Широко распространен тип регулирования (имеющий черты первого и второго) с ежегодным как полным опорожнением, так и наполнением водохранилища при переменной по годам отдаче. Это свойственно большинству ГЭС, водохранилища которых недостаточны для значительного перераспределения стока между годами.

В связи с возможностью перехода от одного вида регулирования стока к другому виду необходимо отметить следующее.

Несмотря на то, что продолжительность или период сработки водохранилища находятся в достаточно тесной связи с видом регулирования (в зависимости от длительности: сезонное или многолетнее), тем не менее для каждого данного водохранилища период регулирования неустойчив. Поэтому существующее в практике деление регулирования на сезонный или многолетний вид является в известном смысле достаточно условным.

Как объясняют С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [4], все случаи регулирования можно отнести к многолетнему, если иметь в виду весьма редко появляющиеся колебания стока. В самом деле, мыслимо ли такое распределение стока в году, когда даже при не очень глубоком сезонном регулировании на постоянную отдачу емкость не будет сработана в межень или не будет заполнена в период одного половодья, что свойственно многолетнему регулированию. И наоборот – при многолетнем регулировании, хотя и не очень глубоком, бывают случаи полной сработки водоема за одну очень маловодную межень с заполнением водоема в ближайшее половодье, что свойственно сезонному регулированию.

Аналогично сезонное регулирование на переменную по годам отдачу водоема, ежегодно опорожняемого для попусков в межень, также может стать многолетним при весьма многоводной межени, когда водоспуск не в состоянии пропустить приток и опорожнить водохранилище. Таким образом, одна и та же емкость может в одних случаях выполнять роль только сезонного регулятора стока, а в других – перераспределять сток между годами.

Значит, с учетом возможных в будущем колебаний стока грань между упомянутыми видами регулирования в некоторой мере стирается. Поэтому строго относить регулирование данным водохранилищем к тому или иному виду можно лишь применительно к известному ходу стока в конкретный период времени.

За критерий, по которому определяется вид регулирования, принимают соотношение между отдачей $A_{\delta p}$ и годовым стоком расчетной обеспеченности W_p . При $A_{\delta p} < W_p$ регулирование стока считается сезонным, соответственно при $A_{\delta p} > W_p$ – многолетним.

Многолетнее регулирование стока. Если величина гарантируемого водопотребления больше обеспеченного объема годового стока ($A_{\delta p} > W_p$), то требуется, очевидно, перераспределение с помощью водохранилища части стока из многоводных лет на маловодные годы. При этом дефицит стока в период маловодного n -летия (на рис. 10 – заштрихованная часть) должен покрываться запасами воды, накопленной в водохранилище еще за предшествовавший маловодью многоводный период.

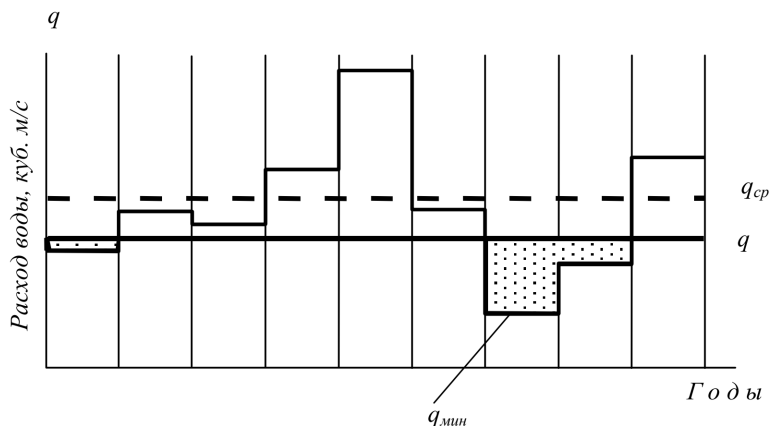


Рис. 10. Схема многолетнего регулирования стока

При многолетнем регулировании цикл работы водохранилища наполнение – сработка длится несколько лет. В отличие от него сезонное регулирование замыкается в пределах только одного года. Практический интерес представляют в отдельности продолжительность наполнения и сработки. Чем больше глубина регулирования, т. е. чем ближе значение годового водопотребления $A_{\delta p}$ к среднему годовому значению объема стока W_o , тем длительнее период наполнения и сработки, тем требуется большая емкость водохранилища, которая резко возрастает с увеличением соотношения $A_{\delta p}$ к W_o .

Необходимо отметить, что при многолетнем регулировании стока всегда емкость водохранилища больше, чем при годовом виде. Это следует из того, что кроме объема для внутригодового регулирования, или сезонной составляющей емкости водохранилища V_c , требуется также многолетняя составляющая емкости V_m для накопления стока многоводных лет с целью использования его позже в маловодные годы. Таким образом, при многолетнем виде регулирования полезная емкость включает две составляющие: $V_n = V_c + V_m$. В одних приемах водохозяйственных расчетов не требуется разделения емкости на составляющие, в других оно необходимо.

С теоретической точки зрения пределом обеспеченного водопотребления при многолетнем виде регулирования стока является $A_{\delta p} = W_o$.

Легко видеть, что если имеется достаточно большая емкость водохранилища, то становится возможным многолетнее или годовое регулирование стока.

В первом случае гарантированное водопотребление будет больше, а среднегодовое за многолетие – меньше, чем во втором [3]. Применение того или другого вида регулирования требует всегда технико-экономического обоснования, при этом следует иметь в виду, что преимущества годового регулирования возможны лишь при наличии избытков воды (превышение объемов гарантированного потребления), если таковые имеются.

Компенсирующее регулирование. Данный вид регулирования стока применяется в случае, если место водозабора или водопользования расположено на реке ниже водохранилища, причем на участке между ними имеется существенный нерегулируемый приток; тогда водохранилище проектируется на обеспеченное покрытие дефицита между годовым графиком водопотребления и расчетным гидрографом стока с незарегулированного участка реки. В этом случае водохранилище должно так зарегулировать проходящий через него сток, чтобы с учетом нерегулируемого промежуточного притока, поступающего в реку ниже водохранилища, получить необходимый режим расходов в пункте водозабора.

Вторичное (или повторное) регулирование стока. Так можно назвать вид регулирования, который вызывается в основном не режимом стока, а режимом регулирования на вышерасположенной водохозяйственной установке, не удовлетворяющим требованиям многочисленных потребителей воды, расположенных ниже по течению реки. Так, например, ГЭС, регулирующая сток на покрытие зимнего максимума нагрузки, может не удовлетворять (по годовому ходу турбинных расходов) условиям нижерасположенного оросительного водопотребления с максимумом в летний период. В таком случае для обеспечения орошения требуется перерегулирование расходов воды гидростанцией.

С некоторой условностью к этому же виду регулирования можно отнести случай, когда компенсирующее водохранилище не может точно приспособиться к режиму нижерасположенных водопотребителей (например, вследствие сложности или невозможности правильного определения времени добегания при перемещении наполнения нижнего бьефа и в других случаях). В по-

добных условиях требуется дополнительное регулирование расходов водохранилищем нижнего водопотребителя. Такое регулирование иногда называется буферным.

Непериодическое регулирование отличается от других видов регулирования стока тем, что оно не имеет строго заданного объема водопотребления или графика работы. Сработка и наполнение водохранилища производятся по мере надобности и возможности (наличия достаточного притока). Этот вид регулирования используется для ряда конкретных потребностей водного хозяйства, например при лесосплаве, на водном транспорте и др.

При лесосплаве такое регулирование применяется наряду с суточным и сезонным регулированием стока. В отличие от сезонного, при котором лесосплав возможен круглосуточно в пределах всего периода регулирования, при непериодическом (как и при суточном) регулировании сосредоточенный попуск из водохранилища для сплотки древесины производится в течение только нескольких часов; запасы же воды накапливаются (в отличие от суточного регулирования) на протяжении многих предшествующих суток.

В отношении к лесосплаву непериодическое регулирование, так же как и суточное регулирование, имеет следующие недостатки:

- ограниченная длина влияния попусков – в среднем примерно не более 30–50 км, а на участках рек с озерами и широкими затопляемыми поймами значительно меньше;
- большая потеря воды в старицах, протоках и заливах;
- усложнение самого процесса сплава, образование заторов из бревен, потеря древесины и т. п. Однако при всех недостатках это регулирование благодаря своей простоте и реализации при помощи плотин элементарной конструкции все же получило распространение в лесосплаве.

На водном транспорте сосредоточенные попуски воды из водохранилища применяются в тех случаях, когда на некоторое непродолжительное время требуется повысить судоходные глубины на перекатах.

В санитарных целях подобные попуски применяются для временного затопления и промывки отдельных участков реки и ее поймы, как мера борьбы с очагами малярии.

В сельском хозяйстве – для затопления пойменных луговых угодий с целью увлажнения сенокосных угодий, а также при лиманном виде орошения.

В рыбоводстве – главным образом для достижения (увеличения) оптимальных глубин в местах расположения нерестилищ, а также с целью предоставить возможностям рыбам выйти в главное русло водотока из сети стариц и проток, отрезанных от него в результате маловодья.

3.3. Показатели регулирования стока

Одними из основных показателей регулирования являются необходимая величина повышения низкого стока, обеспеченная отдача водохранилища, его объем и режим работы, которые устанавливаются расчетным путем.

Обеспеченной, или гарантированной, отдачей водохранилища называется то количество воды, которое можно получить из него за год при заданных значениях процентной обеспеченности и объеме водохранилища. Отдача обычно определяется в абсолютных величинах (в куб.м за год), а также в относительных величинах – в долях от среднегодового стока. Можно также определять отдачу за сезон. В этом случае она соответствует конкретной доле годовой отдачи. В водохозяйственных расчетах различаются отдача брутто и отдача нетто.

Отдача брутто (или просто отдача) состоит из суммы полного хозяйственного годового водопотребления A_n плюс годовой объем потерь из водохранилища $a_{кр}$. При этом потери определяются за критический период, т. е. за период полной сработки водоема. Они включают в себя обычно потери на испарение и фильтрацию (в отдельных случаях учитываются также и потери на льдообразование).

Отдача брутто в долях среднегодового стока G_o называется коэффициентом регулирования стока брутто $k_{бр}$. Отдача, выраженная таким коэффициентом ($k_{бр}$), имеет своим верхним пределом единицу. Однако теоретически при немалых величинах полезного объема и невысокой обеспеченности водоотдачи $k_{бр}$ может быть значительно больше.

Отдача нетто (или полезная отдача) по аналогии с отдачей брутто включает в себя только хозяйственное водопотребление из водохранилища без вышеупомянутых потерь воды из него. Полезная отдача должна удовлетворять гарантируемое водопотребление.

Отдача нетто в долях от среднегодового стока называется коэффициентом регулирования стока нетто k_n .

Таким образом,

$$k_{\bar{o}p} = \frac{A_n + a_{кр}}{G_o}, \quad k_n = \frac{A_n}{G_o}.$$

В практике водохозяйственных расчетов различают также степень использования стока, характеризуемую коэффициентами его использования $\eta_{\bar{o}p}$ и η_n :

$$\eta_{\bar{o}p} = \frac{G_o - C}{G_o}, \quad \eta_n = \frac{G_o - a_{cp} - C}{G_o},$$

где a_{cp} – годовой объем потерь воды из водохранилища в среднем за многолетие; C – среднегодовой объем холостого сброса.

При регулировании стока на жесткий график отдачи с относительно высокой обеспеченностью коэффициенты $k_{\bar{o}p}$ и $\eta_{\bar{o}p}$ практически совпадают. При невысокой обеспеченности, т. е. при частых перебоях, $\eta_{\bar{o}p} < k_{\bar{o}p}$ в связи с недодачей воды потребителям. Для установок, отдача которых за многоводные периоды повышается по сравнению с гарантированной отдачей (таковы, например, гидроэлектростанции), коэффициенты использования стока больше коэффициентов регулирования, и величины η определяются обычно лишь для этих случаев.

Показатели $k_{\bar{o}p}$ и $\eta_{\bar{o}p}$ являются основными и важными характеристиками условий регулирования стока, а коэффициенты k_n и η_n определяют условия обслуживания потребителей воды и энергии: размер полезной отдачи, долю потерь и т. п.

На практике определение потерь и полезной отдачи при заданной отдаче брутто производится обычно табличным расчетом.

Кроме уже рассмотренных характеристик и коэффициентов не менее важным параметром условий регулирования стока является коэффициент емкости водохранилища, представляющий отношение полезного объема водохранилища к среднему объему годового стока:

$$\beta_n = V_n : G_o.$$

Подобные коэффициенты (соотношения) существуют при расчетах многолетнего регулирования стока для сезонной ($\beta_c = V_c : G_o$) и многолетней ($\beta_m = V_m : G_m$) составляющих емкости в том случае, если они определяются отдельно.

При расчетах регулирования стока возникает необходимость решения трех основных задач.

Прямой задачей регулирования считают определение полезной емкости W_n по заданной величине потребления, т. е. по зарегулированному расходу Q или отдаче A_n и по режиму работы водоема.

Обратной задачей является определение величины отдачи водохранилища по его заданной емкости W_n и режиму работы.

Наряду с прямой и обратной задачами решается еще одна задача, связанная с установлением зависимости $Q = f(W_n)$, которая является результатом регулирования по набору ряда вариантов емкости и служит для выбора наиболее приемлемого. Для принятого варианта требуется выявить характеристики режима работы водохранилища за многолетний период (ход его наполнений, сбросов и т. п.).

3.4. Основы методов расчета регулирования стока

Все виды расчетов регулирования, в том числе установление основных параметров водохранилища (емкости, отдачи), режима его работы, производятся на основе подробного анализа гидрологической записки (гл. 2, п. 2.2) и режима речного стока. При этом всегда имеется в виду, что колебания фазово-однородных величин стока носят случайный характер, подчиняющийся определенной закономерности только лишь в смысле распределения вероятностей. Отличием от этого является внутригодовой ход стока, обладающий для большинства рек довольно устойчивой закономерностью, которая отчетливо проявляется по временам года в циклической смене гидрологических фаз водного режима.

При производстве расчетов по регулированию стока вышеуказанные обстоятельства определяют следующие основные принципы использования гидрометрических материалов:

1. Гидрограф стока на будущий длительный период работы водохранилища не может быть надежно предсказан заранее. Для

его определения используется вероятность различных сочетаний стока, а также, для уточнения, данные гидрологических прогнозов, имеющих заблаговременность от нескольких дней до 1–2 месяцев и более. Эта же информация принимается во внимание как в расчетах, так и при эксплуатации водохозяйственных установок.

2. Ряд конкретных значений стока за время наблюдений позволяет получить представление о возможных в будущем особенностях водохозяйственного режима и об их вероятностях (с учетом замечаний об эмпирической обеспеченности).

В существующей теории регулирования стока, исходя из указанных принципов, рассматриваются два основных метода водохозяйственных расчетов:

- а) расчет по фактическому ряду наблюдений стока (в табличной форме или по интегральным кривым притока и потребления);
- б) обобщенный расчет на основе теории вероятностей с использованием статистических параметров стока.

По первому методу за основу водохозяйственного расчета принимаются календарные величины стока гидрологических постов за истекший период. Расчет заключается в непосредственном построении водохозяйственного плана по конкретному наблюденному ряду расходов воды.

Такая система расчета представляет собой не что иное, как процесс эмпирического подбора водохозяйственных параметров в точном соответствии с режимом стока за конкретный период наблюдений. По существу же смысл такого подхода заключается в желании выявить те параметры и особенности гидрологического режима, которые являются характерными для рассматриваемого водотока. В последующем установленные таким образом характеристики и особенности распространяются (по аналогии с прошедшим временем) на будущий (предстоящий) период эксплуатации проектируемой установки.

Второй метод расчета заключается в математическом выражении объективных закономерностей колебаний стока, которые проявляются в распределении вероятностей фазово-однородных значений стока, в циклической смене фаз стока согласно временам года, в определенной связи между величинами стока за смежные промежутки времени. На основе математического выражения указанных закономерностей можно перейти к веро-

ятностному предвидению стока на время эксплуатации установки. Соответственно этому все водохозяйственные показатели ее работы будут выражаться в форме вероятностей. Таким образом, по этому методу при разработке водохозяйственного плана исходной характеристикой становится не сам календарный ряд стока, а установленные по нему статистические параметры кривой обеспеченности.

Для повышения надежности работы установки ожидаемый режим стока и водохозяйственные характеристики корректируются во время ее эксплуатации путем использования краткосрочных (и долгосрочных) гидропрогнозов, что предусмотрено для этой цели при проектировании, а также путем учета изменений, вносимых в режим речного стока хозяйственной деятельностью.

Таким образом, накопленные в гидрологической литературе обобщения в виде фактических календарных рядов наблюдений в рамках второго метода используются для получения статистических параметров речного стока. Построенные на базе принятых параметров кривые обеспеченности служат для получения вероятных значений стока и их сочетаний. При этом исходными для разработки водохозяйственного плана становятся обобщенные характеристики водного режима:

а) кривые обеспеченности основных фазово-однородных величин стока (за год, половодье, межень);

б) расчетное распределение стока за год и для каждой фазы годового цикла (по гидрометрическим материалам).

Принятие того или другого способа расчета зависит от условий водохозяйственной задачи, длительности имеющегося гидрологического ряда и степени регулирования стока, определяющей продолжительность циклов сработки и наполнений водохранилища.

При глубоком многолетнем регулировании решающее значение в режиме работы водохранилища имеют колебания объемов стока за целые годы и по группам лет. Повторяемость этих величин при исследовании гидрометрического ряда имеет важное значение потому, что циклы сработки и наполнения распространяются на несколько лет, число которых увеличивается с повышением степени регулирования. В связи с этим ряд подвергается тщательному анализу.

Для повышения надежности расчета водохранилища по гидрометрическому ряду необходимо к тому же, чтобы он был достаточно длительным и включал бы обязательно серию маловодных лет, которые вызывали бы полную сработку водохранилища. Основой подобного обобщенного расчета служит в таком случае кривая обеспеченности годовых объемов стока. Режим стока внутри года принимается по схеме расчетного распределения.

При меньших степенях регулирования, когда внутригодовое распределение стока приобретает большое влияние на режим работы установки, годовой цикл приходится делить на характерные фазы. Для большинства рек такими четко выраженными фазами являются половодье и межень. Основными характеристиками становятся кривые обеспеченности стока за эти фазы. Распределение расходов воды по каждой из них принимается по расчетным гидрографам.

В случаях, когда регулирование стока незначительно, требуется детальное исследование стока за еще более короткие промежутки времени, состоящие из нескольких месяцев, более или менее однородных по характеру стока.

При отсутствии регулирования рассматриваются среднесуточные расходы воды и рассчитывается обеспеченная отдача установки, работающей без регулирования стока. Характеристикой реки как источника водоснабжения служит при этом кривая обеспеченности минимальных расходов (подобно анализу максимальных расходов ряд минимумов составляется выборкой по одному расходу за год или раздельно: по одному за летне-осеннюю межень – летний ряд и по одному за зимнюю межень – зимний ряд).

Построение расчетных гидрографов для всего года или отдельных его фаз производится на основе выбора моделей внутригодового распределения стока из числа лет фактических гидрометрических наблюдений. При этом строятся и используются кривые обеспеченности стока за год и за характерные фазы, соответственно особенностям решаемых водохозяйственных задач.

Вся совокупность построенных на графике кривых обеспеченности с нанесенными на них эмпирическими точками – зна-

чениями стокового ряда (с обязательным указанием года) позволяет наглядно и обоснованно выбрать наиболее характерные годы-модели: многоводный, средний и маловодный, близкие к заданным для них обеспеченностям.

Гидрограф года-модели затем корректируется путем умножения каждой ординаты гидрографа на коэффициент приведения, который равен отношению объема годового стока заданной обеспеченности к объему стока года-модели. Подобные методы приведения применяются часто и к отдельным фазам: к расходам межени, гидрографам половодий, паводков и т. п.

В случаях, когда вода (или энергия) потребляются равномерно в течение всего года или отдельного сезона, а водохозяйственная установка работает на незарегулированном стоке, вместо расчетных гидрографов в ряде случаев применяются кривые продолжительности суточных расходов [1].

Рассматриваемые приемы расчета имеют свои достоинства и недостатки. Расчет непосредственно по фактическому наблюдаемому стоковому ряду за рассматриваемый истекший период отличается наглядностью и удобством применения к любому сколь угодно сложному водохозяйственному режиму. Но основными его недостатками все же являются:

- 1) неопределенность обеспеченности и поэтому несопоставимость результатов водохозяйственных расчетов;
- 2) невозможность расчета при отсутствии достаточно продолжительных наблюдений за стоком данной реки;
- 3) невозможность широкого обобщения выводов расчета для дальнейшего их использования.

Расчет по обобщенным характеристикам стока в отличие от расчета по фактическому ряду в основном не имеет указанных недостатков. Однако он может давать убедительные результаты лишь совместно с наблюдаемыми данными и при условии, что в нем правильно отражаются указанные выше вероятностные закономерности речного стока.

Водохозяйственный расчет непосредственно по фактическим многолетним данным о стоке тоже не обходится без статистических элементов, точно так же и обобщенный метод расчетов основывается прежде всего на стоковых параметрах по данной реке и окружающим ее бассейнам.

Фактические данные входят в обобщенный расчет в виде исходных статистических параметров стока и его внутригодового распределения, которые определяются также и косвенными путями, применяющимися в гидрологии в виде региональных обобщений характеристик стока и т. п.

Статистические элементы при расчетах стока по фактическому ряду наблюдений используются, например, при определении среднего объема стока за год, при оценке повторяемости стока в расчетах регулирования и во многих других целях. Особую роль играет введение понятия гарантийности при определении и назначении допустимого числа перебойных лет в фактическом ряду. Например, при обеспеченности $P = 90\%$ и при наличии 20-летнего ряда по стоку число перебойных лет должно быть равно двум, если это подтверждается обобщенными расчетами. Создание водохранилища емкостью, достаточной для бесперебойности отдачи в этом ряду, соответствует обеспеченности порядка 95% и т. д.

В результате критерий вероятности в явной или неявной форме берется за основу непосредственного расчета по фактическому ряду стока за истекший период. Длительность периода отражает и соответствующий ей вероятный размах экстремальных отклонений стока, определяющих условия регулирования. Этот размах тем больше, чем длиннее период. Поэтому, вычисляя емкость по ходу стока за довольно длительный период (например, за 20 лет), можно ожидать, что она окажется достаточной для повторяемости сочетаний стока один раз в столько же лет.

Однако, как уже отмечалось, подобное определение необходимой емкости водохранилища могло быть верным только в применении к средней ее величине из нескольких расчетов (например, из ряда 20-летий). Для каждого же отдельного случая (ряда) значение обеспеченности бесперебойной работы водохранилища, рассчитанной по стоку истекшего периода (по этому ряду), значительно меняется (колеблется).

Совершенно очевидно, что чем менее полными (в смысле коротких рядов) являются исходные стоковые данные для обобщенного расчета, тем менее точными будут и его результаты. Расчет непосредственно по недостаточным фактическим данным будет грубо приближенным (или просто невозможным).

Кроме этого, нельзя не учитывать и забывать трудностей получения и накопления дорогостоящих гидрометрических материалов в условиях весьма развитой и крайне разнообразной гидрографической сети на необъятных пространствах нашей страны с различными климатическими условиями и многочисленными типами режима рек. Поэтому при отсутствии достаточной длины стоковых рядов для большинства малых, а иногда и для средних рек обобщенный метод расчета может быть широко применен, давая возможность использовать региональные обобщения характеристик стока и его параметров, выведенных по коротким рядам.

Следует дополнительно также отметить, что статистические параметры, основанные на натурных стоковых рядах наблюдений, одинаковых по длительности, но разных по хронологии, а также при разной их длительности приводят к несравненно более устойчивым результатам обобщенных водохозяйственных расчетов, чем расчеты по соответствующим рядам стока [4, 6]. Кроме этого, расчеты по имеющимся фактическим рядам стока без контроля их по обобщенному методу нельзя считать надежными, так как ни один из имеющихся рядов (даже из числа длительных) не может охватить все возможные сочетания и комбинации последовательности величин речного стока.

Колебания стока за период наблюдений наряду с типичными для реки соотношениями отличаются некоторыми особенностями. Наблюдаемые же в прошлом сочетания в ходе стока неповторимы, каждый стоковый ряд представляет собой лишь случайную выборку, отражающую условия только данного ряда.

Поэтому выводы о размерах сооружений и обеспеченной их отдаче являются в известной мере случайными, а установки, расположенные на разных реках или даже на одной и той же реке (по вариантам проекта), оказываются несравнимыми [6].

Из расчетной практики известно, что объемы водохранилища, определенные для заданной отдачи по периодам одинаковой длительности (25–30 лет), но следующими один за другим, отличаются иногда в 2–3 раза и более. Поэтому наряду с расчетом по гидрометрическому ряду обязательно привлекается вероятностный метод водохозяйственных расчетов, гидрологической основой которого являются обобщенные характеристики стока.

Вероятностный метод расчета по статистическим параметрам того же ряда рассматривает всевозможные сочетания величин стока (с учетом отсутствующих, но возможных в данном ряду), исследует эти величины как свободно варьирующие (в смысле из размеров и последовательности) соответственно обобщенным параметрам. Этим самым исключаются влияния случайных особенностей периода гидрометрических наблюдений.

Во избежание влияния нерепрезентативности короткого ряда годовых величин стока учитывается его положение в циклическом ходе стока [5, 6, 8].

Указанные условия и особенности расчетов по вероятностному методу способствовали широкому его распространению не только при ограниченных сведениях о стоке, но и наряду с расчетами по фактическим длительным рядам и для контроля даваемых ими результатов. Однако этот метод не дает наглядной характеристики режима работы установки.

Искомые водохозяйственные показатели определяются путем математических построений, причем в сложных условиях водохозяйственных расчетов встречаются затруднения. Поэтому во всех случаях водохозяйственного проектирования в различных комбинациях используются элементы обоих методов расчета.

Оба метода, взаимно дополняя друг друга, позволяют исчерпывающе освещать проектный режим водохозяйственной установки. Первый из них применяется для большинства расчетов при гидроэнергетическом проектировании, второй – в основном при расчетах водохранилищ для целей водоснабжения, ирригации и т. п.

Контрольные вопросы

1. С какой целью выполняется регулирование речного стока с помощью водохранилищ?
2. По данным каких обобщений устанавливаются минимумы стока при отсутствии ряда наблюдений?
3. От чего зависит возможность приведения режима стока в соответствие с режимом потребления?

4. Назовите и охарактеризуйте известные виды регулирования.
5. Объясните сущность каждого вида регулирования стока.
6. Чем отличается один вид регулирования от другого?
7. В чем основное отличие непериодического вида регулирования от всех остальных видов регулирования?
8. Какие показатели регулирования вам известны?
9. Охарактеризуйте прямую и обратную задачу регулирования.
10. Какие основные два метода водохозяйственных расчетов применяются в теории регулирования?
11. В чем заключается сущность расчетов по первому методу?
12. В чем заключается сущность расчетов по второму методу?
13. Почему расчеты по имеющимся фактическим рядам нельзя считать надежными без контроля по обобщенному методу?
14. Учитывается ли положение фактического ряда в циклическом ходе стока воды?
15. Используется ли в водохозяйственных расчетах комбинация известных двух методов или нет?

Глава 4

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИВЫХ СТОКА В ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТАХ

В практике водохозяйственных расчетов применяются различные методы регулирования стока, но по существу все они основываются на сопоставлении графика притока и потребления воды.

Графики, отражающие изменение во времени притока в водохранилище и потребления из него, можно представить в виде обычных гидрографов и суммарных (интегральных) кривых. Интегральные кривые наглядно дают представление о хронологической последовательности изменения стока в суммарном виде.

Интегральные кривые широко применяли при проектировании в начале развития методики водохозяйственных расчетов, когда решались простейшие задачи регулирования стока. Но по мере усложнения водохозяйственных задач усложнялись сами расчеты, и интегральные кривые как методическая основа перестали полностью удовлетворять запросы проектирования. В связи с этим в настоящее время интегральные кривые при водохозяйственном проектировании чаще всего используются лишь для иллюстративных целей и для вспомогательных расчетов. Тем не менее, для понимания физического процесса регулирования стока и ознакомления с элементарной методикой расчетов сезонного и многолетнего видов регулирования интегральные кривые не утратили своего важного значения и в настоящее время. К тому же в особо сложных конкретных случаях применение интегральных кривых является единственно приемлемым.

4.1. Интегральные кривые в прямоугольных координатах

Рассмотрим гидрограф стока в произвольном виде (рис. 11), выделим на нем элементарную полоску с основанием dt . Площадью этой полоски определится объем стока dW за интервал времени dt :

$$dW = Qdt.$$

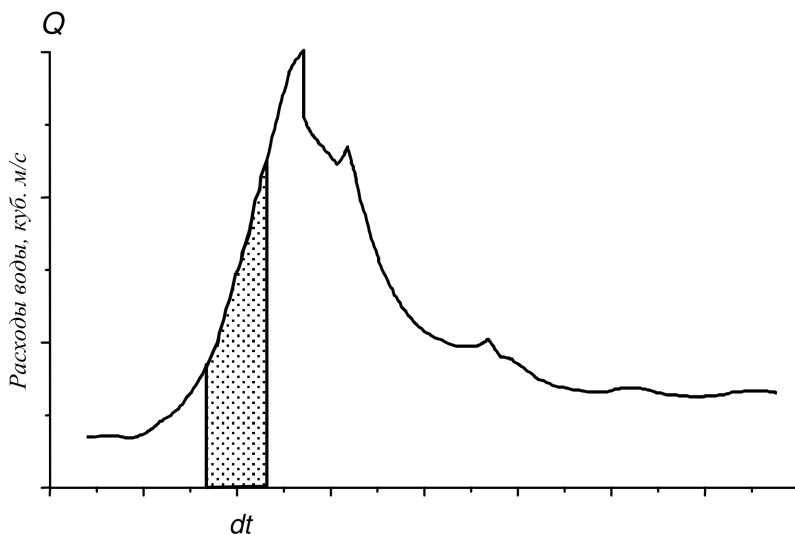


Рис. 11. Гидрограф и элементарный объем стока

Совершенно очевидно, что площадью всего гидрографа определится суммарный объем стока W за период t . Аналитически площадь гидрографа можно выразить интегралом:

$$W = \int_0^t Q dt .$$

Если последовательно вычислять объемы стока $W_1, W_2, \dots, W_n$ соответственно за интервалы времени $0 - t_1, 0 - t_2, \dots, 0 - t_n$ и откладывать их в каком-то масштабе на оси ординат (рис. 12), то получится кривая, характеризующая изменение суммарного стока за период t . Эта кривая и носит название *интегральной кривой стока*.

Чтобы вычислить ординаты интегральной кривой по вышеуказанному выражению, потребовалось бы проделать большую работу по подбору уравнения гидрографа, в чем, однако, особой необходимости нет. Практически вполне достаточно вести расчет, заменив интегральное выражение конечными разностями. В этом случае выражения для определения величин объема стока примут вид:

– за конечный интервал времени Δt :

$$\Delta W = Q \Delta t ;$$

– значение суммарного объема стока:

$$W = \sum_0^t Q \Delta t .$$

Поэтому такую интегральную кривую часто называют еще и *суммарной кривой стока*.

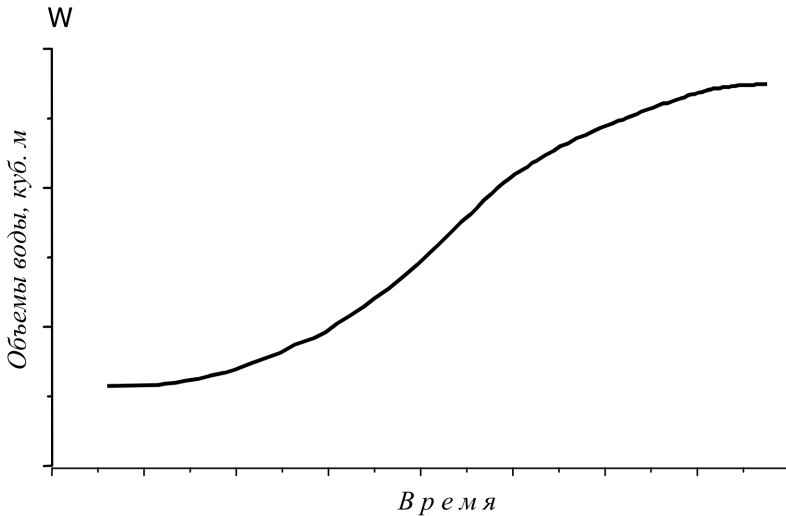


Рис. 12. Интегральная кривая объемов стока

При равных интервалах Δt , на которые будет разбит период времени t , последнее выражение примет вид:

$$W = \Delta t \sum_0^t Q ,$$

где Q – средние расходы в интервалах времени Δt .

4.2. Свойства интегральных кривых

Из сущности и рассмотренного метода построения интегральных кривых вытекают следующие их основные свойства:

1. Каждая ордината интегральной кривой представляет собой суммарную величину стока от начала построения до данного момента времени.

2. Разность ординат в двух точках интегральной кривой соответствует суммарному объему стока за интервал времени между этими точками.

3. Если расход постоянен в пределах какого-то интервала времени, то согласно $W = \sum_0^t Q \Delta t$, $W = Qt$ (т. е. при постоянном

расходе) интегральная кривая обращается в прямую линию. Отсюда следует, что если гидрограф задан в виде ступенек, интегральная кривая будет представлена ломаной линией.

4. Тангенс угла наклона к оси абсцисс линии, секущей интегральную кривую в точках A и B , выражает величину среднего расхода воды в интервале времени между точками A и B (рис. 13):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = Q.$$

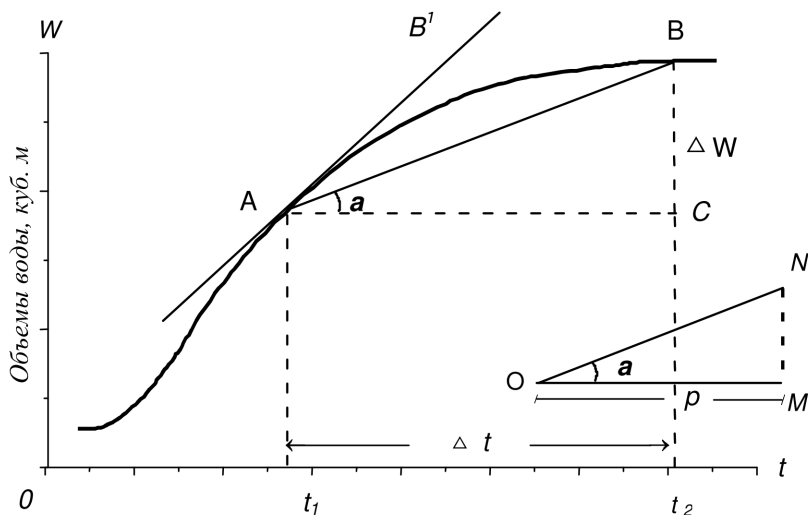


Рис. 13. Интегральная кривая и лучевой масштаб

5. Если точку B приближать к точке A и в пределе совместить с нею, то секущая обратится в касательную, и тангенсом угла наклона ее к оси абсцисс выразится расход в точке A :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dW}{dt} = Q.$$

Следует отметить, что вышеуказанные тангенциальные соотношения справедливы лишь только в том случае, если интегральные кривые будут построены в численно одинаковых масштабах по вертикали и по горизонтали (например, по оси ординат 1 мм соответствует 1 куб.м и по оси абсцисс 1 мм – 1 сек). Обычно на практике интегральные кривые строятся в различных масштабах, что необходимо обязательно учитывать следующим образом.

Обозначим масштаб объемов через m_W , а масштаб времени через m_t . Тогда длины отрезков BC и AC составят (рис. 13):

$$BC = \frac{\Delta W}{m_W} \quad \text{и} \quad AC = \frac{\Delta t}{m_t}.$$

Подставляя найденные значения, получим:

$$\operatorname{tga} = \frac{\Delta W}{m_W} : \frac{\Delta t}{m_t} = Q \frac{m_t}{m_W},$$

откуда будем иметь

$$Q = \operatorname{tga} \frac{m_W}{m_t}.$$

Таким образом, для того чтобы правильно определить расход воды непосредственно по интегральной кривой, необходимо измерить соответствующий тангенс угла наклона касательной в интересующей точке и умножить его на отношение масштабов объемов и времени.

4.3. Лучевой масштаб

Непосредственное определение на интегральной кривой расхода с применением тангенса угла наклона неудобно, поэтому

в практических расчетах рекомендуется пользоваться специальным вспомогательным графиком, называемым *лучевым масштабом*, позволяющим по наклону секущей или касательной прямо читать расходы. Сущность лучевого масштаба сводится к следующему.

В произвольном, свободном и удобном для чтения графика месте проводится горизонтальный отрезок $OM = p$, а через точку M – вертикальная линия (рис. 13, справа внизу). Проведем через точку O линию ON параллельно AB ; получим треугольник ONM , подобный треугольнику ABC . Из подобия треугольников следует, что

$$\frac{NM}{p} = \frac{BC}{AC} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = Q,$$

откуда

$$NM = pQ.$$

Следовательно, на вертикальной линии отсекается отрезок NM , пропорциональный расходу Q . Легко понять, что вертикальная линия есть шкала расходов воды, а сам треугольник в целом называется *лучевым масштабом*. Точка O называется полюсом лучевого масштаба, а отрезок p – полюсным расстоянием.

Для того чтобы построить лучевой масштаб и правильно пользоваться им, необходимо задаться удобным масштабом шкалы расходов m_Q и определить p .

Имея в виду, что $tga = Q$, выражение для NM перепишем в виде $NM = ptga$. Далее, принимая во внимание, что значение

$$tga = \frac{\Delta W}{m_w} : \frac{\Delta t}{m_t} = Q \frac{m_t}{m_w},$$

получим

$$\frac{Q}{m_Q} = p \frac{m_t}{m_w} Q,$$

а после преобразований найдем, что

$$p = \frac{m_w}{m_Q m_t}.$$

Помимо рассмотренной прямой задачи, лучевой масштаб дает возможность решить также и обратную задачу: по заданному гидрографу стока построить интегральную кривую притока воды в водохранилище.

Тем не менее измерение величины расходов непосредственно на интегральной кривой с помощью построенного лучевого масштаба имеет существенный недостаток, заключающийся в достаточно невысокой точности переноса по чертежу (с помощью линейки и треугольника) направления и длины сравнительно коротких отрезков с интегральной кривой на лучевой масштаб. Поэтому с целью уточнения определения величин расходов на интегральной кривой или для проверки проведения на графике интегральной кривой отрезков, соответствующих заданному расходу, в практике принято применять дополнительно графо-аналитический и аналитический способы.

Для этого за выбранный интервал времени Δt находится приращение стока ΔW и по уже известному соотношению $tga = Q$ – расход воды. Графически ΔW находится путем измерения в масштабе m_W вертикального расстояния в конце Δt между интегральной кривой и горизонтальной линией, проходящей через точку на кривой начала данного интервала времени, а если аналитически – то по таблице к интегральной кривой, по разности суммарного стока конца и начала интервала времени Δt .

4.4. Подсчет и построение интегральных кривых

В соответствии с наличием исходных данных о стоке воды, общей продолжительности рассматриваемого периода, требований проектирования интегральные кривые строятся с различной временной подробностью: по суточным, пятидневным, декадным, месячным, сезонным и годовым интервалам времени. Наиболее часто они строятся по месячным интервалам. Тогда исходными данными служат значения средних месячных расходов.

Подсчет интегральных кривых на практике удобно вести в табличном виде. В табл. 3 рассмотрен такой пример подсчета интегральной кривой.

Практический подсчет интегральных кривых

№ п/п	Дата или интервал	Расход Q , куб.м/с	Объем стока за интервал $\Delta W = Q \Delta t$	Суммарный объем W на конец интервала
1	1998-III	250	0,89	0,89
2	II	870	2,56	5,76
3	I	1350	4,78	9,45
.	.	...	...	...
		Сумма		

При подсчетах обычно используются следующие фактические количества секунд (миллионы): для суток – 0,0864, пятидневки – 0,432, декады – 0,864, месяца – 2,630 и для года – 31,536.

Число секунд за месяц и год принимается среднее (с учетом високосных лет). В последнюю декаду месяца независимо от числа дней в ней число секунд обычно берется одним и тем же и равным 0,864 млн.

Если таблица занимает несколько страниц, то во избежание просчетов, которые все равно в дальнейшем явно обнаружатся при построении интегральной кривой (главным образом по ее резкому перегибу), необходимо производить последовательную постраничную проверку таблицы. С этой целью рекомендуется продолжать суммирование стока на следующей странице (заполнение графы 5) только лишь после проверки вычисления стока на предыдущей странице. Эта проверка заключается в том, что $\Delta t \sum Q$ данной страницы должна быть практически равна разности последних цифр суммарных объемов W данной и предыдущей страниц (здесь $\sum Q$ – постраничная сумма расходов).

Обычно интегральные кривые строятся в самых различных масштабах в зависимости от желаемой точности расчетов регулирования и длительности периода, за который она строится. Так, при построении интегральной кривой за длительный период можно рекомендовать практически удобный масштаб для шкалы времени (оси абсцисс) в 3 или 6 мм – 1 месяц. В подобном случае в пределах одного месяца на чертеже легко выделить декаду (1 или 2 мм) или даже пятидневку (0,5 или 1 мм).

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность сопоставления графиков притока воды и графика водопотребления и для чего она предназначена?
2. В каком виде представляются вышеназванные графики?
3. Что такое интегральная кривая стока или притока?
4. В чем сущность интегральной кривой?
5. Назовите все свойства интегральной кривой.
6. Объясните лучевой масштаб, для чего он применяется.
7. Объясните ход построения интегральной кривой.
8. Объясните порядок пользования интегральными кривыми в разных масштабах ординаты и абсциссы.

Глава 5

РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ КРИВЫМ ПРИ ЖЕСТКОМ ГРАФИКЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ

Определим понятие жесткого графика водопотребления. Жестким называют такой график потребления, ординаты которого точно фиксированы на конкретные календарные даты и остаются неизменными в течение длительного периода времени при переходе от одного года к другому. Такой график расходов имеет ступенчатый вид.

Жесткий график потребления при постоянной величине расхода представляет в частном случае наиболее простую форму, а водохозяйственные расчеты по нему относятся к простейшим задачам регулирования стока.

5.1. Расчеты регулирования стока на постоянный расход

В условиях регулирования стока на постоянный расход подразумевается, что потребители используют воду по ровному (постоянному) графику водопотребления независимо от сезона года

и при переходе от одного года к другому. В реальных случаях появления избытков притока над потреблением избытки воды вначале идут на наполнение водохранилища, а затем сбрасываются вхолостую.

Перед тем, как начать расчеты регулирования стока, необходимо изучить два основных положения:

- нужно ли регулирование вообще;
- каковы масштабы ожидаемого регулирования.

Необходимость в регулировании устанавливается путем простого сравнения величин потребного (зарегулированного) расхода воды $Q_{зар}$ с минимальным средним суточным расходом реки $Q_{мин}$. Если $Q_{зар} > Q_{мин}$, то регулирование требуется, так как в эти сутки естественный сток не покрывает потребности потребителя в воде.

Масштабы регулирования определяются аналогично: посредством сравнения годового объема потребления воды (зарегулированного стока) W со стоком маловодного года W_p с заданной обеспеченностью p . При $W \leq W_p$ будет иметь место сезонное регулирование, а при $W > W_p$ – многолетнее.

Чтобы приступить к решению основных задач расчетов регулирования речного стока, определим вначале необходимые начальные условия.

Прежде всего, для этих целей режим стока следует представить в виде известных графиков – в форме гидрографа или в виде соответствующей интегральной кривой: при сезонном виде регулирования – за расчетный маловодный год, при многолетнем регулировании – за длительный ряд лет или за расчетный период. Выбор расчетных стоковых условий, т. е. вопрос о том, каким требованиям должен удовлетворять график стока, по которому ведутся расчеты, нами уже рассмотрен.

Кроме этого, в перечисленных ниже задачах при расчетах многолетнего регулирования в качестве гарантированной отдачи принимается зарегулированный расход $Q_{зар}$, определяемый по наиболее неблагоприятному маловодью за весь многолетний ряд наблюдений. Переход к гарантированной отдаче заданной обеспеченности излагается ниже в другом разделе.

Для рассмотрения решения основных задач теории регулирования речного стока будем использовать интерпретацию режима стока в форме интегральных кривых. Кроме этого, предпо-

ложим, что принимаемые нами графики стока (интегральные кривые) выбраны надлежащим образом с учетом как многолетних колебаний стока, так и с учетом требуемой надежности покрытия величины потребления воды.

5.1.1. Основные задачи расчетов регулирования стока

1. По заданной величине зарегулированного расхода $Q_{зар}$ требуется определить необходимую полезную емкость водохранилища.

2. По заданной емкости водохранилища требуется определить обеспечиваемый ею зарегулированный расход.

3. Требуется установить зависимость величин $Q_{зар}$ от W .

Прежде чем приступить непосредственно к последовательному решению задач расчета регулирования стока с применением интегральных кривых, составим баланс водохранилища, который определяется объемами поступающей и расходуемой воды.

Запас воды W_t , содержащийся в водохранилище в момент t , выразится равенством

$$W_t = W_o + \int_{t_0}^t (Q_{np} - Q_{зар}) dt = W_o + \int_{t_0}^t Q_{np} dt - \int_{t_0}^t Q_{зар} dt,$$

где W_o – запас воды в начальный момент t_o ; Q_{np} – расход воды, поступающей в водохранилище; $Q_{зар}$ – расход воды, отводимой из водохранилища потребителю.

Из приведенного равенства видно, что первый интеграл выражает приращение объема поступающего в водохранилище притока за рассматриваемый интервал времени $(t - t_o)$, а второй – приращение (наращивание) объема расходуемой из водохранилища воды.

Как уже установлено, процесс нарастания притока к водохранилищу во времени выражается интегральной кривой. Очевидно, подобной же интегральной кривой можно представить нарастание расходуемой водохранилищем воды. Отсюда разности ординат интегральных кривых притока и потребления воды будут характеризовать состояние наполнения водохранилища (или количество воды в нем) в каждый произвольный момент времени.

Допустим, что в пределах некоторого произвольного отрезка времени объемы поступающей в водохранилище и отводимой из него воды будут равны, т. е.

$$\int_{t_0}^t Q_{np} dt = \int_{t_0}^t Q_{zap} dt .$$

В таком случае наполнение водохранилища в начале и конце интервала времени $t - t_0$ останется одинаковым (не будет изменяться), так как оба интеграла равны. Следовательно, параллельная интегральной кривой линия, отстоящая вверх или вниз от нее на некотором расстоянии, будет характеризовать неизменное наполнение водохранилища. При этом если указанное расстояние в масштабе объемов чертежа взять равным полезной емкости водохранилища, верхняя из них представит интегральную кривую опорожненного водохранилища, а нижняя – наполненного. Любая другая параллельная линия, проведенная в полосе между этими интегральными кривыми, будет характеризовать промежуточное и также неизменное наполнение водохранилища, равное в масштабе объемов чертежа расстоянию между интегральной кривой опорожненного водохранилища (верхняя линия) и данной линией.

При неравенстве потребления притоку наполнение водохранилища будет изменяться, уменьшаясь при меньшем притоке и увеличиваясь при большем притоке по сравнению с потреблением. Поэтому интегральная кривая зарегулированного стока, выражающая полную величину (брутто) отводимого из водохранилища расхода (включая полезное потребление, холостые сбросы и потери), изобразится линией, которая в периоды восстановления израсходованных запасов воды водохранилища и расходования этих запасов не будет параллельна интегральной кривой притока.

Таким образом, в зависимости от состояния наполнения водохранилища и соотношения между притоком в водохранилище и потреблением воды линия зарегулированных расходов будет параллельна интегральной кривой или составлять с ней некоторый угол, не выходя за пределы полосы, ограниченной двумя интегральными кривыми, удаленными друг от друга на расстояние, равное емкости водохранилища.

В дальнейшем исходную интегральную кривую будем называть *основной*, а любую дополнительно построенную в связи с проводимыми расчетами регулирования – *контрольной*.

5.1.2. Сезонное регулирование

Для того чтобы по заданному расходу определить емкость водохранилища, на интегральной кривой в прямоугольных координатах за водохозяйственный расчетный маловодный год (рис. 14) проводим вправо касательную Aaa' с наклоном заданного расхода $Q_{зар}$ (по лучевому масштабу). Эта касательная есть не что иное, как интегральная кривая зарегулированного расхода воды в пределах меженной (маловодной) части рассматриваемого водохозяйственного (гидрологического) года.

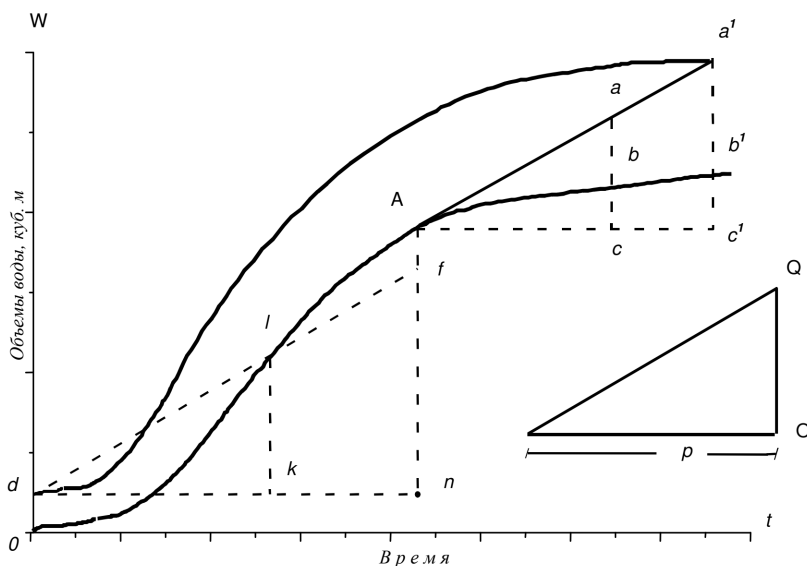


Рис. 14. Нахождение емкости водохранилища по заданной величине расхода

Так как зарегулированный расход больше естественных расходов притока, то ординаты (за исключением точки касания) новой интегральной кривой превышают ординаты интегральной

кривой естественного стока (выше их). Следовательно, к водохранилищу притекает воды меньше, чем используется (забирается) потребителями, иначе говоря, здесь имеет место дефицит или недостаток объема воды.

Величины дефицита определяются непосредственно по графику в масштабе шкалы объемов по расстоянию между интегральными кривыми зарегулированного и естественного стока, т. е. разностью их ординат, что справедливо вытекает из свойств интегральных кривых. Например, в момент времени s дефицит составляет av , а в конце года, совмещенного с концом межени, он достигает максимального значения $a'v'$. В самом деле, за весь период межени Ac' приток составляет $v'c'$, а зарегулированный сток $a'c'$. Отсюда дефицит определяется по формуле:

$$a'v' = a'c' - v'c'.$$

Совершенно очевидно, что для полного покрытия дефицита необходимо располагать соответствующими запасами воды в водохранилище. Эти запасы должны создаваться накануне – в предшествующий маловодью многоводный период. Так как величиной $a'v'$ определяется полный дефицит, то в данном году достаточно иметь запасы, равные $a'v'$. Иначе говоря, дефицитом $a'v'$ определяется необходимая (потребная) полезная емкость водохранилища W , соответствующая (удовлетворяющая) зарегулированному расходу $Q_{зар}$ расчетного года. Для того чтобы полностью обеспечить этот расход к началу межени (в точке A), водохранилище должно быть наполнено: сработается же водохранилище в конце межени, в точке a' . Определив полезную емкость водохранилища W и рассмотрев порядок срабатывания ее, проанализируем теперь порядок наполнения.

Расчет наполнения производится следующим путем. На расстоянии, равном емкости водохранилища, проводится контрольная интегральная кривая, параллельно и выше основной. Она исходит из точки d , которая соответствует концу межени, когда водохранилище опорожнено, и называется, как указано выше, интегральной кривой опорожненного водохранилища. В этом случае основная интегральная кривая является кривой наполненного водохранилища.

Из точки d на контрольной кривой, соответствующей концу межени предшествующего водохозяйственного года и началу половодья рассматриваемого года, проводится луч заданного расхода до пересечения с основной интегральной кривой в точке l . В этот момент водохранилище оказывается наполненным. Таким образом, водохранилище наполняется в течение периода dk , а в последующий период до начала сработки (точка A) оно остается наполненным, отчего линия интегральной кривой зарегулированного стока совпадает с естественной. Этот период (kn) характеризуется работой водохранилища на приточных расходах, превышающих заданный Q , следствием чего являются излишки, обращающиеся в сброс. Нетрудно видеть, что объем сбросов равен Af , так как из общего притока за период от начала наполнения водохранилища до начала сработки, выражающегося ординатой A , объем Od пошел на наполнение полезной емкости, а объем fn – на удовлетворение потребности в воде. Именно таким образом и решается первая задача.

Вторая задача – определение по заданной емкости водохранилища величины зарегулированного расхода воды – решается путем проведения действий, обратных тем, которые выполняются при решении первой задачи, а именно: от конца основной интегральной кривой вверх в соответствующем масштабе откладывается заданная емкость водохранилища W_1 в виде отрезка av (рис. 15).

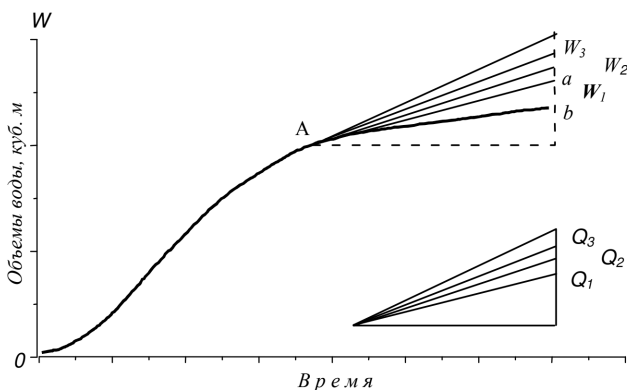


Рис. 15. Определение зарегулированного расхода по заданной емкости водохранилища

Посредством проведения назад от отложенной точки касательной к интегральной кривой в точку интересующего момента времени A и определится обеспечиваемый данной емкостью водохранилища зарегулированный расход воды. Величина его может быть найдена по лучевому масштабу (рис. 15) или через тангенс угла наклона этой касательной. Дальнейший расчет и построение линий других зарегулированных расходов на остальной части года производится аналогично и ничем не отличается от предыдущего.

Для решения третьей задачи – установления нужной зависимости $Q_{зар}$ от W – достаточно рассмотреть только меженную часть года. Решение состоит в построениях, аналогичных второй задаче, и заключается в том, что задается ряд значений емкости водохранилища $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ и по интегральной кривой (рис. 15) и лучевому масштабу определяются соответствующие им зарегулированные расходы $Q_{зар 1}, Q_{зар 2}, Q_{зар 3}, \dots, Q_{зар n}$. Затем на основании полученных таким образом данных строится зависимость $Q_{зар} = f(W)$. Крайними точками этой зависимости являются: точка при $W = 0$, которой соответствует расход $Q_{зар}$, равный минимальному расходу $Q_{мин}$ водотока; точка при $W_{макс}$, при которой обеспечивается полное внутригодовое регулирование, т. е. $Q_{зар} = Q_{ср}$. Вид подобной зависимости изображен на рис. 16.

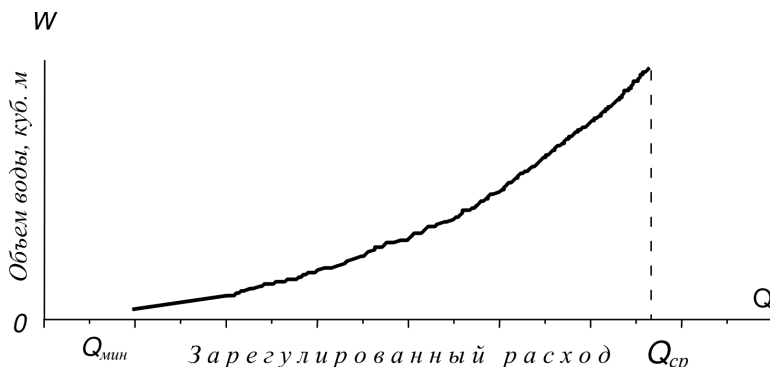


Рис. 16. Зависимость зарегулированного расхода от объема водохранилища

В рассмотренном примере расчета регулирования стока контрольная интегральная кривая строилась выше основной кривой. В данном случае она служила интегральной кривой опорожненного водохранилища, а основная кривая – наполненного. Напомним, что расстояния между основной интегральной кривой и линией зарегулированного расхода $ав$, $а'в'$ и т. д. (рис. 14) выражают величины сработки водохранилища.

Между тем при расчетах регулирования стока больший интерес представляют имеющиеся фактические запасы воды в водохранилище, т. е. разности между его емкостью и сработкой ($W - ав$, $W - а'в'$ и т. д.). Важно отметить: для того чтобы непосредственно из построений по графику получать содержащиеся в водохранилище запасы воды (иначе говоря, из наполнений водохранилищ), нужно контрольную интегральную кривую строить ниже основной. При этом она будет являться кривой наполненного водохранилища, а основная – опорожненного водохранилища. При построении контрольной интегральной кривой ниже основной порядок расчетов регулирования стока по сравнению с уже изложенным методом практически не меняется.

Так, для решения первой задачи (по заданному расходу определить емкость водохранилища) линию под углом заданного расхода следует проводить под основной интегральной кривой (ходом назад), касаясь конца ее. Потребная емкость водохранилища при этом получится по наибольшему расстоянию между линией зарегулированного расхода и основной интегральной кривой. Определив емкость водохранилища, строят контрольную кривую ниже основной, затем проводят расчет регулирования, как указано выше.

Первую задачу сезонного регулирования можно решить и другим способом, а именно: по всем годам имеющегося (или расчетного) гидрологического ряда проводятся расчеты регулирования по периоду межени на заданный постоянный расход. По полученным для каждого года различным емкостям обычным путем строится кривая обеспеченности. Потребная для зарегулирования в расчетном маловодном году заданного расхода емкость водохранилища находится по этой кривой при обеспеченности

$$p(\beta) = 100 - p(\alpha),$$

где $p(\alpha)$ – расчетная обеспеченность, с которой гарантируется регулированием заданный расход $Q_{зар}$.

5.1.3. Многолетнее регулирование

Целью многолетнего регулирования является сглаживание многолетних колебаний стока. При производстве расчетов этого вида регулирования рассматривают не отдельные водохозяйственные годы, как это имело место в случае сезонного вида регулирования, а натурные гидрологические ряды наблюдений достаточно большой длительности.

Прежде всего, для решения и расчета уже рассмотренных основных задач многолетнего вида регулирования стока необходимо на интегральной кривой внутри длительного ряда наблюдений отыскать наиболее маловодный период. На рис. 17 таким периодом, очевидно, является серия лет 1994–1999 или, возможно, более длительный период (за пределами графика), если глубина многолетнего регулирования будет очень большой.

Первая задача (по заданному расходу определить емкость водохранилища) решается путем проведения касательной AE к интегральной кривой в конце маловодья ходом назад с наклоном (определяется через $arctg$) заданного расхода $Q_{зар}$ (рис. 17).

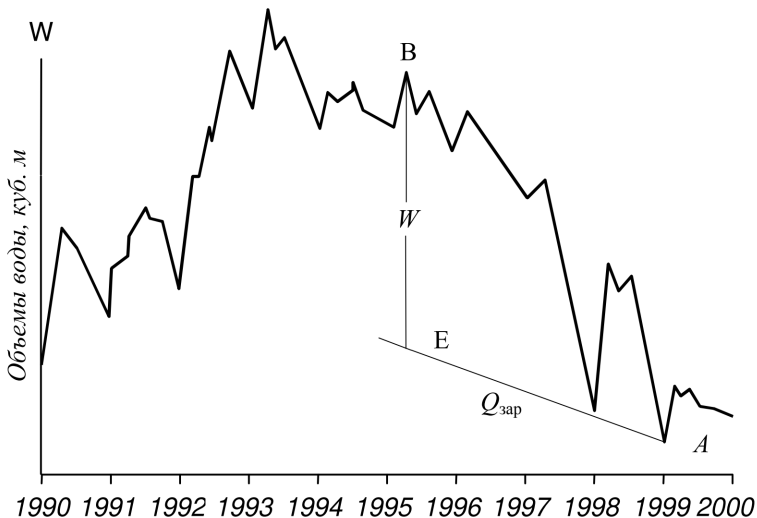


Рис. 17. Определение емкости водохранилища по заданному расходу при многолетнем регулировании стока

Потребную для осуществления многолетнего регулирования емкость водохранилища W по заданному расходу $Q_{зар}$ определит наибольшее расстояние EB между проведенной касательной и интегральной кривой в пределах всего маловодья.

Выполненным расчетом охвачен только период срабатывания водохранилища. При заданном зарегулированном расходе $Q_{зар}$ в процесс сработки вовлечены маловодные 1997–1999 гг., а также межень предшествующих им 1995–1996 гг. Не требует пояснения, что при значительно большей величине зарегулированного расхода $Q_{зар}$ сработка водохранилища может начаться намного раньше, так как и 1994 г. является очень маловодным, несмотря на то, что маловодное трехлетие (1997–1999 гг.) отделено от 1994 г. двумя годами несколько повышенной водности (1995 и 1996 гг.).

После определения таким методом полезной емкости водохранилища W проводят расчеты регулирования по остальным годам имеющегося ряда наблюдений, для чего на этом же графике строят контрольную интегральную кривую.

В первую очередь выполняется расчет по периоду, следующему за полной сработкой водохранилища, т. е. от точки A вправо. Этот период (в нашем случае один 2000 г.) характеризуется несколько повышенным суммарным притоком по сравнению с зарегулированным расходом $Q_{зар}$. Следовательно, в течение этого периода будет происходить постепенное восстановление ранее израсходованных запасов воды, т. е. водохранилище будет наполняться. Линию EA необходимо продолжить вправо до пересечения с контрольной интегральной кривой. Пересечение этих линий означает, что в этой точке (по времени) водохранилище наполнилось. В последующем продлении совпадение и расхождение линий зарегулированного расхода и контрольной интегральной кривой будет означать соответственно, что приток в водохранилище больше или меньше зарегулированного расхода $Q_{зар}$.

Решение второй задачи начинается с выделения периода маловодья (рис. 18). Далее на расстоянии, равном заданной емкости водохранилища W , ниже от основной кривой строится контрольная интегральная кривая. Затем в полосе между основной и контрольной кривыми проводится касательная AB , которая соединяет конец маловодья основной кривой и начало маловодья контрольной

ной интегральной кривой. Наклон этой касательной, исходя из свойств интегральных кривых (с помощью лучевого масштаба), и даст искомую величину зарегулированного расхода.

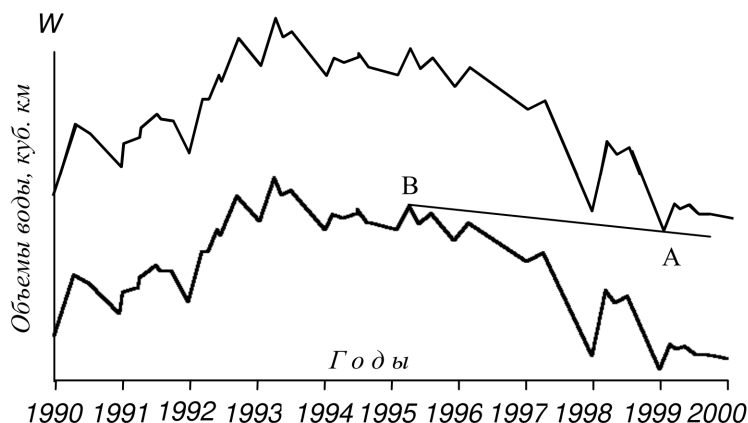


Рис. 18. Определение зарегулированного расхода по заданной емкости водохранилища при многолетнем регулировании стока

Третью задачу следует решать по аналогии с сезонным регулированием стока. Для этой цели задаются значениями зарегулированных расходов и по интегральной кривой снимают соответствующие им величины потребных емкостей водохранилища. По полученным таким образом данным и строится кривая $Q_{зар} = f(W)$. Верхним пределом этой зависимости в отличие от сезонного вида регулирования стока будет являться значение среднего многолетнего годового расхода воды $Q_{зар\text{ ср}}$.

Контрольные вопросы

1. Какой график потребления называется жестким?
2. Как устанавливается необходимость в регулировании стока?
3. Как определяется масштаб регулирования?

4. Объясните, что такое глубина регулирования стока.
5. Назовите основные задачи расчетов регулирования стока.
6. Объясните технологию решения первой задачи при сезонном регулировании.
7. Объясните технологию решения второй задачи при сезонном виде регулирования стока.
8. Объясните технологию решения третьей задачи при сезонном виде регулирования стока.
9. Поясните, каким образом решаются основные задачи регулирования при многолетнем регулировании.

Глава 6

ВИДЫ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

6.1. Расчеты регулирования стока на ступенчатый график расходов

Часто характер водопотребления меняется в течение года или внутри ряда лет. Поэтому в каждом из этих периодов можно выделить относительно длительное время с более или менее постоянным режимом потребления воды, и таким образом режим водопотребления приобретает ступенчатый вид. В таких случаях регулирование стока производится на жесткий ступенчатый график потребления, согласованный с участниками водохозяйственного комплекса.

Производство расчетов и необходимых построений для регулирования стока с использованием интегральных кривых на жестко заданный ступенчатый график расходов по существу ведется совершенно одинаково и в той же последовательности, как это было показано для случаев регулирования на постоянный расход (жесткий график потребления воды).

Рассмотрим определение полезной емкости водохранилища, например при двухступенчатом графике, который может иметь место при работе конкретной водохозяйственной установки, ко-

гда для поддержания необходимых условий в нижнем бьефе подпорного сооружения в оросительное время требуется один расход Q_1 , а в зимнее время – другой расход Q_2 .

В подобном случае для решения поставленной задачи к интегральной кривой в конце маловодного периода ходом назад проводится касательная расходом Q_2 в интервале зимнего времени, а от конца ее проводится луч расходом Q_1 в интервале оросительного времени. Естественно, что при сезонном виде регулирования построение ломаной линии с расходами Q_2 и Q_1 ведется внутри пределов расчетного маловодного года, а при многолетнем регулировании в пределах всего маловодного периода – как одна непрерывная линия с чередованием заданных расходов Q_2 , Q_1 , Q_2 и т. д. (рис. 19).

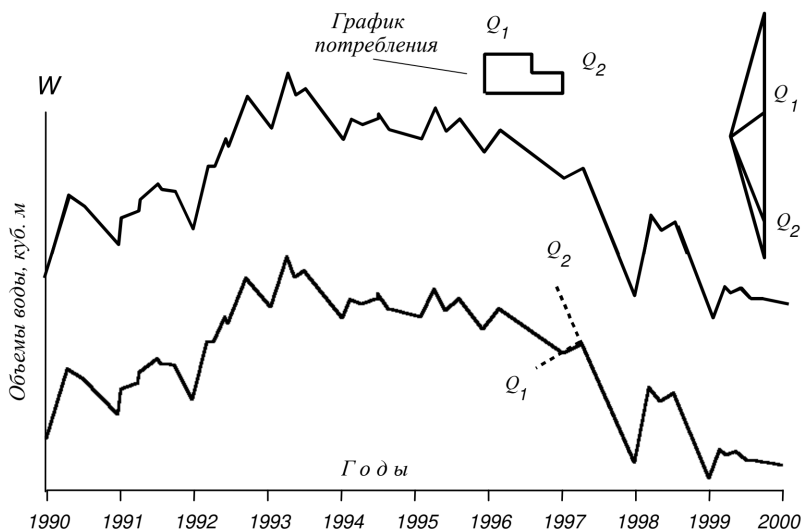


Рис. 19. Расчеты регулирования на двухступенчатый график потребления

Потребная емкость водохранилища для обеспечения регулирования по заданному двухступенчатому графику потребления определится, как обычно, по наибольшему отклонению линии

зарегулированных расходов от основной интегральной кривой в пределах лимитирующего маловодного периода.

Определив размеры полезной емкости водохранилища, строят контрольную интегральную кривую и далее продолжают расчет по тем же расходам воды Q_1 и Q_2 ходом вперед:

а) при сезонном регулировании – от начала водохозяйственного года, где водохранилище принимается опорожненным, до встречи с контрольной интегральной кривой и далее по ней до начала сработки водохранилища в меженную часть года, т. е. до точки, в которой определилась величина емкости;

б) при многолетнем регулировании – от конца маловодья, где водохранилище опорожнено, до конца гидрологического ряда, а затем от начала ряда до начала сработки за маловодье, т. е. также до точки, в которой определилась величина емкости.

С целью сохранения баланса стока необходимо запасы воды водохранилища, имеющиеся в конце гидрологического ряда, принять и на его начало (см. рассмотренный выше расчет многолетнего регулирования на постоянный расход).

В результате выполненных построений имеем непрерывную линию зарегулированных расходов Q_1 и Q_2 , а при наполненном водохранилище – естественных расходов, т. е. получается интегральная кривая зарегулированного стока.

Для того чтобы выполнять расчет сезонного регулирования по заданному графику и в другие, кроме маловодного, годы, по которому определена величина полезной емкости водохранилища, необходимо выполнить следующее.

При найденной по маловодному году емкости строят контрольную интегральную кривую, и от конца половодья – начала межени на ней проводится ходом вперед луч заданного расхода Q_1 и далее Q_2 до конца межени. Для сохранения баланса запасы воды в водохранилище в конце водохозяйственного года принимаются и на начало следующего года, и затем расчет продолжается как обычно.

Чтобы решить обратную задачу – определения по заданной емкости величины зарегулированных расходов – обязательно должен быть также задан один из расходов Q_1 или Q_2 , иначе задача становится неразрешимой. Следует первоначально определить среднюю величину зарегулированного расхода путем проведения касательной к концу маловодья основной интегральной

кривой и к началу маловодья – контрольной кривой. Затем по найденному среднему расходу и заданному Q_1 или Q_2 по балансу стока за период сработки водохранилища, исходя из суммарной длительности действия этих расходов вычисляется соответственно другой расход – Q_1 или Q_2 .

6.2. Баланс водохранилища, табличный способ расчета регулирования стока

Кроме рассмотренных уже графических методов регулирования речного стока с применением интегральных кривых, существует табличный способ расчета регулирования, который сводится к решению уравнения баланса водохранилища. Для интервала времени Δt уравнение баланса принимает вид:

$$\pm \Delta V = Q_a \Delta t (Q_{np} - Q) \Delta t = [Q_{np} - (Q_u + Q_c + Q_n)] \Delta t ,$$

где ΔV – изменение наполнения водохранилища (аккумуляция). Знак плюс соответствует увеличению наполнения водохранилища, знак минус – уменьшению (сработки); Q_a – расход аккумуляции, выражающий разность расходов притекающего в водохранилище Q_{np} и зарегулированного брутто Q ; Q_u – используемый расход; Q_c – расход холостых сбросов; Q_n – суммарный расход потерь и отъемов воды из водохранилища.

В зависимости от необходимой точности и подробности расчет баланса водохранилища ведется по различным интервалам времени Δt (пятидневкам, декадам или месяцам). Соответственно этому основными расчетными величинами будут средние пятидневные, средние декадные или средние месячные расходы воды. Можно также вести расчеты и по более мелким (сутки) или по более крупным интервалам времени (сезоны, годы). Расчеты регулирования стока общепринято делать по форме табл. 4.

Принципиальная схема и последовательность расчета остается практически такой же, что и при графических видах расчетов. Например, для определения емкости водохранилища по заданному расходу воды расчет ведется ходом назад:

а) при сезонном регулировании стока – с конца расчетного маловодного года;

б) при многолетнем виде регулирования – с конца наиболее неблагоприятного маловодного периода.

В графу 3 заносят расходы притока воды в водохранилище, т. е. естественные расходы стока или учитывающие в том числе регулирование другими водохранилищами.

В графу 4 вписывают заданный зарегулированный расход брутто (или несколько расходов), затем последовательно определяют разности (расходы аккумуляции), записываемые потом в графу 5. Умножением этих разностей на соответствующий интервал времени Δt в секундах вычисляют объемы аккумуляции (графа 6), суммированием которых ходом назад (снизу вверх) находят наполнения водохранилища на конец расчетных интервалов (графа 7). Наибольшим наполнением в пределах расчетного года (при сезонном регулировании) или в пределах всего неблагоприятного маловодного периода (при многолетнем регулировании) и определится искомая полезная емкость водохранилища.

Таблица 4

Расчет регулирования стока табличным способом

№ п/п	Дата (расчетный интервал)	Расходы, куб. м/с			Объемы, куб. км	
		притока	зарегули- рованные	аккумуля- ции	наполнения водохранилища	
					на конец интервала	на середину интервала
1	2	3	4	5	6	7

Горизонты верхнего бьефа, м		Площадь зеркала на середину интервала, кв. км	Расходы воды, куб.м/с			
на конец интервала	на середину интервала		потерь и отъемов	холо- стых сбросов	сумма потерь сбросов	зарегули- рованные
8	9	10	11	12	13	14

Определив размеры полезной емкости водохранилища, продолжают расчет ходом вперед:

а) при сезонном виде регулирования – от начала водохозяйственного года до момента заполнения емкости и далее до начала сработки при работе водохранилища на приточных расходах, т. е. при полном наполнении водохранилища;

б) при многолетнем регулировании – от начала предыдущего расчета, т. е. с конца маловодья до момента заполнения емкости и далее до конца всего периода, работая или на приточных расходах, или на заданном расходе.

Далее выполняется расчет от начала рассматриваемого периода до начала сработки в течение всего маловодья. При этом с целью сохранения баланса стока в пределах всего рассматриваемого периода наполнение водохранилища в начале периода принимается равным наполнению в его конце.

Дальнейший расчет сводится к определению зарегулированных расходов нетто (табл. 4, гр. 15), для чего необходимо вычислить потери, затем отъемы воды (гр. 12), холостые сбросы (гр. 13) и т. п. Потери вычисляются или как средние в пределах каждого интервала Δt , или как средние за многолетний период. В первом случае потери находятся при наполнении водохранилища, равном среднему за время Δt (гр. 8), а во втором, естественно, среднему за весь период.

В случаях значительных изменений во времени потерь и отъемов воды зарегулированные расходы нетто могут колебаться в больших пределах от интервала к интервалу. Поэтому при необходимости иметь выровненный расход нетто следует откорректировать выполненный расчет, сделав постоянным величину зарегулированного расхода нетто, для чего вводится дополнительная графа 16. Зарегулированный расход брутто при этом соответственно изменится, изменится также и ход наполнения и сработки водохранилища.

В рассмотренных выше задачах расчетов многолетнего регулирования стока найденный по наиболее неблагоприятному маловодному периоду зарегулированный расход $Q_{зар}$ принимался в качестве гарантированной отдачи. Тем самым мы как бы считали, что установка работает бесперебойно в течение рассматриваемого периода, т. е. гарантированная отдача обеспечивается

в течение всего периода на 100%. С народнохозяйственной точки зрения, как было показано, такая обеспеченность не находит оправдания. Поэтому гарантированная отдача проектируется с обеспеченностью меньшей, чем 100%.

Для того чтобы по календарному гидрологическому ряду сделать табличный расчет при условии наперед заданной обеспеченности гарантированной отдачи, календарный ряд должен быть достаточно длинным. В составе такого длинного ряда выделяется определенное число перебойных лет, т. е. лет со сниженной отдачей по сравнению с гарантированной величиной. Например, при обеспеченности 95% и длительности ряда 60 лет число перебойных лет равно трем. За счет более низкой отдачи в перебойные годы несколько повышается гарантированная отдача воды по сравнению с расходом Q , определенным по наиболее неблагоприятному маловодному периоду.

Эта величина гарантированной отдачи Q_p может быть установлена путем балансирования объемов воды за маловодный период, по которому при заданной полезной емкости водохранилища V определен зарегулированный расход $Q_{зар}$ (или наоборот: по заданному расходу определена емкость водохранилища). Для этого надо задаться каким-то допустимым в данных конкретных условиях снижением отдачи за пределами расчетной обеспеченности. Если, например, снижение отдачи по сравнению с расходом Q принимается на 30%, то гарантированный расход составит:

$$Q_p = \frac{QT - 0,7Qt}{T - t},$$

где T – длительность маловодного периода, определившего расход воды Q ; t – длительность периода со сниженной отдачей водохранилища до величины $0,7Q$.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается сущность ступенчатого графика водопотребления?
2. Объясните, как в принципе определяется потребная емкость водохранилища на двухступенчатый график регулирования стока.

3. Объясните, как определяется потребная емкость водохранилища на двухступенчатый график регулирования стока при сезонном виде регулирования.

4. Объясните, как определяется потребная емкость водохранилища на двухступенчатый график регулирования стока при многолетнем регулировании.

5. Объясните, как определяется потребный зарегулированный расход (обратная задача) при двухступенчатом графике регулирования стока.

6. Напишите уравнение водного баланса водохранилища и охарактеризуйте его составляющие.

7. По каким временным интервалам времени составляется уравнение водного баланса?

8. В какой последовательности ведется табличный расчет регулирования стока?

9. Какой длины необходим календарный ряд для расчета обеспеченности гарантированной водоотдачи?

10. Приведите известную формулу определения гарантированного расхода отдачи.

Глава 7

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НА ВОДОТОКАХ С ОЗЕРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

В тех случаях, если под водохранилище проектируется использовать существующий озерный водоем, то расчеты регулирования следует производить не по расходам стока из этого озера, а по расходам притока в него. Необходимость выполнения расчетов по расходам притока вызывается тем обстоятельством, что в режиме расходов стока отображено влияние регулирования самим озером в современных (естественных) условиях и, следовательно, вести водохозяйственные расчеты по этим расходам было бы неправильно, так как в таком случае дважды будет уч-

тено регулирующее влияние озера. Расходы притока могут быть получены:

а) по сумме расходов притоков, впадающих в озеро, включая сток с водосбора, не учтенного притоками;

б) по расходам стока основного водотока в створе, где намечается постройка подпорных сооружений, с обязательным вычетом расходов аккумуляции в озере в современных условиях.

Необходимо отметить, что при первом способе получаются величины притока брутто, и поэтому при водохозяйственных расчетах из них следует исключать величины испарения с водной поверхности (за вычетом осадков). При втором способе определяются величины полезного притока за вычетом испарения минус осадки на зеркало озера. В связи с этим в водохозяйственных расчетах потери на испарение следует рассчитывать и учитывать лишь с дополнительной площади затопления.

По первому способу получения расходов притока при наличии достаточных данных наблюдений (что, к сожалению, имеет место далеко не всегда) все понятно и не требует пояснений. Поэтому рассмотрим определение расходов притока вторым способом.

На рис. 20 изображен примерный график хода уровней водоема (озера). За интервал времени Δt_{1-2} уровень повысился на ΔH_{1-2} . Данное повышение уровня обусловлено задержанием части притока, поступившего в водоем, отчего сток из водоема оказался меньше притока в него. За интервал же времени Δt_{3-4} , наоборот, уровень понизился на ΔH_{3-4} , потому что часть ранее накопленного объема воды сработалась, в следствие чего сток из водоема стал больше, чем приток в него.

Указанное задержание части притока обуславливается недостаточной пропускной способностью истока водотока, вытекающего из озера, и поэтому не обеспечивающей на подъеме половодья при данных уровнях водоема пропуск в реку всего расхода притока. На спаде половодья ситуация обратная: пропускная способность этого же истока при достигнутых на подъеме уровнях оказывается больше притока, что и обуславливает сработку водоема.

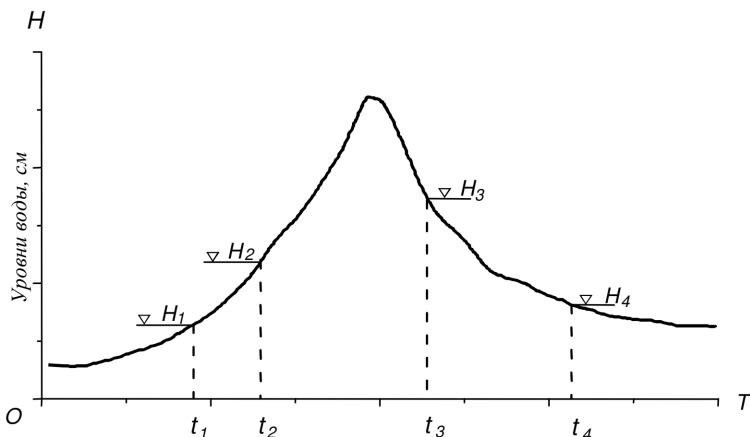


Рис. 20. График уровней водоема озерного типа

Объем воды, задержанной в водоеме (озере) или сработанной из него (объем положительной или отрицательной аккумуляции), равен разности между объемами притока и стока:

$$\Delta W = \Delta W_{np} - \Delta W_{cm} = (Q_{np} - Q_{cm}) \Delta t.$$

Объем ΔW , получающийся по балансу стока воды, размещается в призме рассматриваемого водоема между соответствующими уровнями H_1 и H_2 , H_3 и H_4 и т. п.

Следовательно,

$$\Delta W = \Delta V = \Delta H F_{cp},$$

где F_{cp} — площадь зеркала на уровне

$$H_{cp} = \frac{H_1 + H_2}{2}.$$

Принимая во внимание два последних уравнения и учитывая, что задача настоящего расчета сводится к нахождению Q_{np} , можно написать следующее соотношение:

$$Q_{np} = Q_{cp} \pm \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

Совершенно очевидно, что знак плюс отвечает подъему уровня, знак минус – спаду уровня водоема. Форма гидрографа притока более острая по сравнению с гидрографом стока (рис. 21).

Для подсчета расходов притока необходимо иметь расходы стока, данные наблюдений над уровнями водоема и топографическую характеристику водоема $F = f(H)$.

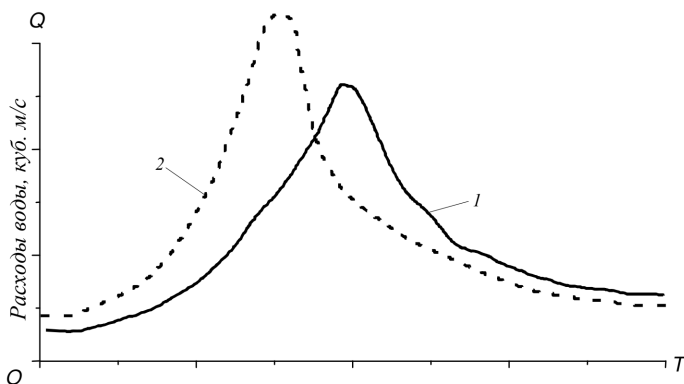


Рис. 21. Гидрографы стока и притока:
1 – сток; 2 – приток

Если наблюдения велись на нескольких постах, расположенных в различных частях водоема, то уровни следует брать в расчет как среднее арифметическое из показаний этих пунктов наблюдений. Несколько гидрологических постов необходимо иметь на акватории озера для того, чтобы исключить в производимых расчетах ветровые сгонно-нагонные изменения уровней.

Подсчет расходов притока при этом ведется обычно в следующей табличной форме.

Расчет притока воды в водохранилище

№ п/п	Дата, расчетный интервал	$Q_{ст}$, куб.м/с	H на конец интервала, м	H на середину интервала, м	ΔH , м	$F_{ср}$, кв.км	ΔV , куб.м	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$	$Q_{пр}$, куб.м/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Контрольные вопросы

1. По каким расходам (притока или стока) следует производить расчеты, если намечается использовать под водохранилище озерный водоем?
2. В каких расходах (притока или стока) выражается регулирование озером?
3. По каким расходам могут быть получены значения притока?
4. С какой площади зеркала в водохозяйственные расчеты следует вводить потери на испарение?
5. Какова пропускная способность истока на спаде и на подъеме половодья?
6. Напишите уравнение положительной и отрицательной аккумуляций в водоеме.
7. Как соотносятся гидрографы стока и притока (приведите график)?

Глава 8

ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ПЕРИОДА И РАСЧЕТНЫХ ЛЕТ

В соответствии с глубиной намечаемого регулирования стока и стадии проектирования расчеты выполняются или по календарному периоду, состоящему из ряда лет наблюдений, или по отдельным выбранным характерным годам.

Если рассматривать сезонный вид регулирования стока, то на предварительных стадиях проектирования допускается производить расчеты по отдельным характерным годам. На завершающих стадиях водохозяйственного проектирования или для окончательно принятых вариантов на предварительных стадиях проектирования расчеты сезонного регулирования необходимо обязательно выполнять по календарному периоду. Здесь под термином «период» следует понимать весь имеющийся гидрологический ряд наблюдений или (в случае его большой длительности) выбранный из него соответствующий расчетный период.

При многолетнем виде регулирования стока независимо от стадии проектирования расчеты, как правило, ведутся по всему ряду. Лишь при неглубоком многолетнем регулировании допускается выполнять расчеты по выбранному характерному периоду.

В качестве расчетных лет принимаются следующие водохозяйственные годы:

- а) маловодный с расчетной обеспеченностью p ;
- б) близкий по водности к среднему;
- в) многоводный с обеспеченностью $p' = 1 - p$.

Указанные необходимые годы выбираются из имеющегося гидрологического ряда наблюдений по признакам общей водности, с использованием для этого кривой обеспеченности годового стока и внутригодового распределения стока, а также развернутых гидрологических характеристик в течение года. Последнее понимается в том смысле, что каждый из выбранных лет должен быть или маловодным, или близким к среднему, или многоводным на протяжении всего года.

При выборе расчетного маловодного года, кроме того, особое внимание обращается на водность той части года, в пределах которой срабатывается водохранилище, так как ею определяются размеры полезной емкости. Поэтому наряду со статистической обработкой гидрологических данных по годовому стоку проводят аналогичную обработку их и по меженному стоку за период ожидаемой сработки водохранилища.

Целью такой обработки является получение статистических параметров меженного стока. Для этого по ряду имеющихся средних годовых наблюдений стока строится кривая обеспеченности, с помощью которой устанавливается по значению обеспеченности p соответствующая ей величина годовой водности. Затем по ней из числа лет гидрологического ряда отыскивается год с меженным стоком, близким к расчетному при заданном p .

Задачей дальнейшего анализа является: отобрать в имеющемся ряду среднегодовых значений такой реальный год, в котором сток межени и всего годового периода по возможности отвечали бы заданной обеспеченности p (были бы близкими по отношению друг к другу). Часто не удается отыскать такой подходящий год, особенно при ограниченной длительности ряда. В этом случае отбирается год, близкий к нему по величине стока

межени, и затем делается приведение его к расчетному стоку межени путем перемножения расходов данного года на значение отношения годового расчетного стока к фактическому стоку. Подобной приводкой, однако, достигается соответствие только меженного стока расчетному меженному стоку, а годовой сток может остаться несколько неувязанным, чем обычно пренебрегают.

Расчетный календарный период также выбирается на основе анализа всего имеющегося гидрологического ряда наблюдений. Выбранный период должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- а) по общей водности он должен быть близким к норме;
- б) в состав его должны входить годы различной водности, а также характерные сочетания лет различной водности;
- в) коэффициент изменчивости годового стока за рассматриваемый расчетный период должен быть близким к коэффициенту изменчивости годового стока за весь гидрологический ряд;
- г) в пределах расчетного периода должен по возможности замыкаться цикл регулирования стока (многолетнего).

Длительность расчетного периода при сезонном регулировании обычно принимается равной 15–20 годам, а при многолетнем регулировании – более 20 лет. Указанная длительность рассматриваемых календарных периодов, конечно, условна, так как эта длительность зависит от характера многолетних колебаний стока и требует соответствующего своего обоснования.

В. Г. Андреев, исследовавший этот вопрос [1], рекомендует производить выделение из имеющегося гидрологического ряда более короткого расчетного периода, удовлетворяющего поставленным требованиям, по интегральным кривым отклонений от середины годовых модульных коэффициентов $(K - I)$ и величин $(K - I)^2$. Для удовлетворения условия равенства норме среднего стока за расчетный период линия, секущая интегральную кривую $(K - I)$ в точках начала и конца расчетного периода, должна быть горизонтальной. Признаком равенства коэффициентов изменчивости расчетного и длинного периодов является горизонтальность линии, секущей интегральную кривую $(K - I)^2$ в начале и конце выделенного периода.

Для окончательного подтверждения репрезентативности выделенного расчетного периода следует на теоретическую кривую обеспеченности, построенную по значениям и параметрам длин-

ного ряда, нанести точки за годы расчетного периода по этой же обеспеченности в длинном ряду. Эмпирические точки за годы расчетного периода должны ложиться сравнительно равномерно и близко к теоретической кривой обеспеченности. Равномерность распределения эмпирических точек должна подтвердить также отсутствие резкого расхождения в величинах коэффициентов асимметрии за короткий и длинный периоды рядов наблюдений.

Если средний сток за принятый расчетный период несколько отличается от нормы, то это расхождение должно быть устранено уже известным путем: введением соответствующей поправки в гидрологические данные. Приведение ряда к норме длинного ряда производится перемножением расходов расчетного периода на отношение нормы к среднему стоку последнего или же путем введения корректива в конечные результаты водохозяйственных расчетов.

Если по рассматриваемому створу имеется только короткий ряд, то в этом случае привлекаются материалы длиннорядного аналога. Репрезентативность короткого ряда проверяется по разностной интегральной кривой ($K - I$) для реки-аналога с длинным календарным рядом. При нерепрезентативности имеющегося ряда из него исключается часть лет из начала и конца или добавляются годы, сток которых определяется по графику связи с рекой-аналогом.

Контрольные вопросы

1. В зависимости от чего расчеты регулирования выполняются по календарному или по отдельным характерным годам?
2. По каким рядам при сезонном регулировании выполняются расчеты на предварительной и окончательной стадиях проектирования?
3. По каким рядам при многолетнем регулировании выполняются расчеты на предварительной и окончательной стадиях проектирования?
4. Назовите водохозяйственные годы, принимаемые в качестве расчетных.
5. На какую часть водности обращается особое внимание при выборе расчетного маловодного года?
6. Охарактеризуйте подход к оценке репрезентативности короткого расчетного ряда.

Глава 9

РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ПОТРЕБЛЕНИЯ

Применение статистических методов и подходов к расчетам регулирования стока основывается на том положении, что условия работы водохранилища и его режим определяются взаимодействием речного стока и потребления воды. При этом речной сток рассматривается как случайная величина, подчиняющаяся известным законам распределения вероятностей. Потребление же является продуктом деятельности человека и не обнаруживает случайных колебаний, если не считать колебаний, являющихся результатом, обусловленным изменчивостью самого речного стока.

Из этого следует система расчета, которая применяет математическую статистику непосредственно к явлениям речного стока и в итоге получает необходимые водохозяйственные характеристики как результат математического анализа исходя из распределения вероятностей стока.

Вначале статистические методы расчета применялись лишь к годовым значениям стока, не учитывая известных внутригодовых периодических его изменений, поскольку случайные колебания в наиболее чистом виде проявляются именно в рядах годового стока. Поэтому основанные на этом положении методы водохозяйственных расчетов, во-первых, решают только задачи многолетнего регулирования; во-вторых, касаются не полной емкости, потребной для многолетнего регулирования, а лишь многолетней составляющей, т. е. той части, которая необходима для выравнивания многолетних колебаний стока. Другая же часть емкости – сезонная составляющая, обусловленная внутригодовой равномерностью стока, – определяется независимо от первой и при помощи иных специальных методов.

Подобное деление емкости водохранилища на составляющие части – многолетнюю и сезонную – является условным и возникло исторически в связи с первыми предложениями по мето-

дике статистических расчетов (указанные составляющие иногда просто называют *многолетней емкостью* и *сезонной емкостью*).

В последующее время был сделан новый шаг в развитии теории регулирования стока, характеризовавшийся углублением и расширением области применения статистических методов. От годовых величин стока отказались и перешли к величинам стока за характерные по водности фазы, что позволило рассматривать емкость водохранилища, необходимую для осуществления многолетнего регулирования, как единое целое, без условного разделения ее на составляющие части – многолетнюю и сезонную.

Одновременно с этим был решен и методический вопрос расчета регулирования стока на сложный график водопотребления – на отдачу, изменяющуюся в зависимости от водных ресурсов конкретного водохранилища.

Основной характеристикой годового стока и его изменчивости, как известно, является норма $\bar{Q}$ и коэффициент изменчивости C_v . Характеристикой регулирования является отдача A , потребная для ее поддержания емкость водохранилища V и обеспеченность бесперебойной отдачи p .

Еще в начале века А. Хазен [9] подробно исследовал связь интенсивности колебаний стока с величиной стока, потребной для поддержания заданной отдачи многолетней составляющей емкости водохранилища, и пришел к выводу, что между такими параметрами регулирования, как A , V_{mn} , p и параметрами стока $\bar{Q}$, C_v должна существовать функциональная зависимость:

$$A = f(\bar{Q}, C_v, V_{mn}, p).$$

Это явилось тем новым, что было внесено А. Хазеном в систему гидрологических и водохозяйственных расчетов и использовано позже отечественными специалистами и учеными при разработке теории статистических методов расчета регулирования стока.

Статистические методы расчета регулирования стока разрабатывались и развивались на базе гидрологических материалов хорошо изученных водотоков разных физико-географических зон, что позволяло в конечном итоге сделать широкие обобщения. Многие эти обобщения доводились до расчетных графиков,

получивших всеобщее признание и распространение ввиду обобщенности, относительной простоты расчета и сопоставимости результатов регулирования по ним.

В прошлом, когда по многим речным бассейнам гидрологические материалы полностью отсутствовали или имелись за непродолжительный период, такое развитие теории регулирования оказалось весьма плодотворным, так как стало возможным решение водохозяйственных задач вне зависимости от наличия исходных гидрологических данных наблюдений.

Основные на использовании богатого опыта гидрологии по большому числу рек, обобщенные методы расчета многолетнего регулирования исходят из большого количества различных возможных комбинаций стока, в то время как в расчетах по календарным стоковым рядам даже при их значительной длине учитывается лишь одна единственная комбинация, наблюдавшаяся в конкретном истекшем периоде. Таким образом, можно утверждать, что обобщенные методы расчета многолетнего регулирования дают более надежные результаты. В этом заключается одно из важных преимуществ обобщенных методов расчета многолетнего регулирования перед расчетами по календарным стоковым рядам (по интегральным кривым).

Расчеты по статистическим методам обычно ведутся в относительных величинах. Наиболее часто используются следующие обозначения:

а) годовой сток любого члена ряда – в виде модульного коэффициента $K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$;

б) отдача – коэффициент регулирования $\alpha = \frac{Q_{зар}}{\bar{Q}}$;

в) коэффициент многолетней емкости водохранилища $\beta = \frac{V_{мн}}{\bar{Q}}$;

г) обеспеченность бесперебойной отдачи p (в процентах или в долях от единицы), т. е. число лет, в течение которых будет гарантироваться отдача по отношению к общему числу лет ряда.

Здесь Q_i – средний годовой расход воды любого года, куб.м/с;

$\bar{Q}$ – средний многолетний расход, куб.м/с; $Q_{зар}$ – зарегулиро-

ванный (гарантированный) расход, куб.м/с; $V_{\text{ми}}$ – многолетняя емкость водохранилища, куб.м; произведение $31,5 \cdot 10^6$ на Q_i – средний годовой объем стока, куб.м.

Контрольные вопросы

1. Назовите положение, на котором основывается применение методов математической статистики.
2. Объясните многолетнюю и сезонную составляющие емкости водохранилища.
3. В чем заключался новый шаг в развитии теории регулирования?
4. В чем заключалось открытие Хазена?
5. Укажите основное преимущество обобщенного метода над методом использования календарных рядов.

Глава 10 **РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА НА ПЕРЕМЕННУЮ ОТДАЧУ**

10.1. Определение и расчетные предпосылки

Наблюдаемая неравномерность внутригодового распределения стока и его непостоянство для одних и тех же сезонов в разные годы обуславливают необходимость перехода режима работы водохранилища к переменной отдаче.

Для реализации подобного перехода величина отдачи назначается в зависимости от времени года и от имеющегося на данную дату запаса воды в водохранилище. При этом должны быть дополнительно выполнены специальные правила управления его работой. Эти правила разрабатываются с учетом ожидаемого (с той или иной степенью вероятности) хода стока на основе данных о его режиме за прошедшие годы.

Упомянутые правила составляются с таким расчетом, чтобы можно было в любое время года:

- а) выявлять избытки воды для использования их на повышение отдачи из водохранилища;
- б) обеспечивать гарантированную водоотдачу;
- в) смягчать перебои отдачи за пределами расчетной обеспеченности, уменьшая глубину перебоев за счет увеличения их продолжительности;
- г) снижать холостые сбросы;
- д) ликвидировать возможные ситуации переполнения водохранилища над НПП и МПП.

Таким образом, составление подобных правил практического управления, специфических для каждого водохранилища и оформляемых в виде *диспетчерского графика*, дает возможность повысить использование стока за счет необеспеченных избытков воды, случайно появляющихся в любое время и в довольно широких пределах. Совершенно очевидно, что использование необеспеченных избытков воды возможно, если находятся потребители этой дополнительной отдачи. Такие возможности имеются для водоснабжения ряда предприятий и населенных пунктов из нескольких источников в маловодных районах (например, на северном Кавказе), для гидростанций, работающих как единая энергосистема или обслуживающих так называемых потребителей-регуляторов, а также и для других водопользователей.

Реализация переменной отдачи имеет огромное народнохозяйственное значение, так как сравнительно небольшим водохранилищем достигается высокое обеспечение минимума отдачи, а за счет усиленного потребления воды в многоводные периоды осуществляется общее высокое использование стока.

На диспетчерском графике по оси ординат откладываются емкости водохранилища или соответствующие им отметки верхнего бьефа, а по горизонтальной оси – время года. Характерными линиями поле графика разделено на несколько зон, каждой из которых соответствует режим работы водохранилища с определенной отдачей. К характерным линиям диспетчерского графика относятся следующие линии:

1. *Противоперебойная* линия, представляющая собой верхнюю границу зоны гарантированной отдачи и состоящая из двух ветвей:

а) ветви опорожнения, ограничивающей упомянутую зону за период межени (маловодного периода) и не допускающей чрезмерной сработки водохранилища;

б) ветви весеннего наполнения, обеспечивающей накопление до конца половодья необходимого запаса воды для поддержания необходимой отдачи в межень.

2. *Противосбросовая* линия, представляющая собой нижнюю границу зоны с отдачей, повышенной в пределах до максимального водопотребления водохозяйственной установки (во избежание сбросов) и состоящая также из двух ветвей:

а) ветви предполоводного опорожнения, обеспечивающей освобождение к началу половодья некоторой части емкости для аккумуляции высоких вод;

б) ветви наполнения, предотвращающей чрезмерно быстрое заполнение водохранилища (во избежание возникновения сбросов).

3. *Линии пониженной отдачи*, которые являются границами, разделяющими перебойную зону соответственно некоторым последовательно уменьшающимся величинам отдачи в процентах или в долях (например, 90, 80, 70%) от полной гарантированной отдачи. Предназначены они для уменьшения глубины перебоя. Эти линии строятся обычно для периода межени сработки водохранилища.

Противоперебойная и противосбросовая линии охватывают своими ветвями следующие части емкости водоема (рис. 22а):

а) в узких границах неполного годового регулирования стока (при $A_{\text{бр}} < M_p + P_p$) эти линии проводятся от НПГ до ГМО, т. е. распространяются на всю полезную емкость водохранилища;

б) если водохранилище имеет больший полезный объем (соответственно степени регулирования в пределах от неполного годового при $Q_p > A_{\text{бр}} > M_p + P_p$ до высокого многолетнего регулирования) и эксплуатируется с полной ежегодной сработкой до ГМО, то при этом весенние сбросы уменьшаются, использование стока повышается (хотя гарантированная отдача при многолетнем регулировании падает по сравнению с вариантом регулирования стока без ежегодной сработки до ГМО).

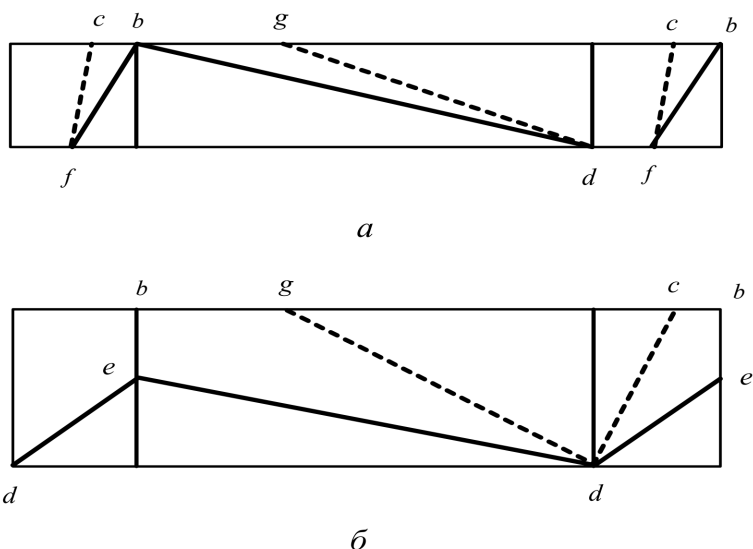


Рис. 22. Очертания противоперебойной (—) и противосбросовой (---) линий:

а – при неполном годовом регулировании;
 б – при водохранилище избыточных размеров

В таком случае для предотвращения излишних перебоев при неполном годовом виде регулирования на отдачу $A_{\delta p} = M_p + P_p$ противоперебойная линия охватывает нижнюю часть графика (ниже точки e на рис. 22б), заполняемую объемом половодья обеспеченностью $p = P_p$ с учетом отдачи за весну; противосбросовая линия, как и в первом случае, проходит через всю емкость от НПГ до ГМО; противоаварийная линия назначается во избежание возможного превышения максимального и катастрофического горизонтов;

в) при многолетнем регулировании и сравнительно высокой степени неполного годового регулирования ($Q_p > A_{\delta p} > M_p + P_p$) обе линии проводятся в пределах от НПГ до наинизшей в конце межени диспетчерской точки a , означающей сработку, заполняемую расчетным маловодным половодьем (при поддержании в течение половодья гарантированной отдачи).

Противоперебойные линии для указанных случаев следующие:

1) для неполного годового вида регулирования речного стока при $A_{\bar{p}} < M_p + P_p$ – линия fbd (рис. 22а);

2) для гарантированной отдачи $A_{\bar{p}} = M_p + P_p$, но при наличии водохранилища избыточных размеров и при ежегодной сработке его до ГМО – линия ded (рис. 22б). Выше точки e имеется избыточная емкость, причем водохранилище могло бы обеспечить более значительную гарантированную отдачу.

Чтобы не нарушать гарантийность обеспеченной полезной отдачи, противоперебойная линия должна показывать достаточно большие величины объемов для периода между характерными точками (между концами сезонов весна – межень – весна). Это означает, что при рассмотрении нескольких вариантов хода сработки и наполнения с учетом только гарантированной отдачи и различных по распределению, но одинаковых по величине расчетных минимальных меженных (и весенних) объемов стока в качестве искомой противоперебойной линии должна быть принята верхняя огибающая для ветвей сработки и наполнения.

Противосбросовая линия, как отмечено, имеет назначение предотвращать чрезмерно быстрое заполнение емкости.

Соответственно обе ветви этой линии строятся по повышенной отдаче (до полной производительности установки) и с учетом нескольких различных по распределению, но одинаковых по объему обеспеченных многоводных меженных (и весенних) объемов стока, а в качестве искомой противосбросовой линии принимается нижняя огибающая для обеих ветвей:

1) для регулирования на отдачу $A_{\bar{p}} < M_p + P_p$ – линия $gdfc$ (рис. 22а). Длина отрезка df зависит от степени регулирования и от производительности водохозяйственной установки. Наличие этого отрезка означает, что в многоводные половодья и при опорожненном водохранилище к их началу не удастся обойтись без холостых сбросов даже при работе установки с полной производительностью на протяжении всего половодья;

2) для регулирования на отдачу $A_{\bar{p}} = M_p + P_p$ при наличии избытка емкости водохранилища – линия gdc (рис. 22б).

Все указанные кривые строятся навстречу ходу времени, т. е. ходом назад, причем ветви наполнения противоперебойной и противосбросовой линий строятся от НПГ до наинизшей диспетчерской точки, а ветви сработки тех же линий – от наинизшей точки до НПГ.

Статистические характеристики для сезонных объемов стока (весна, межень) и расчетные величины этих объемов определяются по фактическим рядам наблюдений стока в рамках жестких календарных дат. 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). Назначением жестких дат весеннего сезона автоматически определяются одновременно постоянные границы межени.

Варианты моделей распределения стока для весны и межени отбираются также из фактических рядов, но уже не в жестких границах, а по фактической продолжительности каждого отобранного сезона и с приводкой объемов стока этих фактических сезонов к расчетному объему стока в жестких датах. При отсутствии необходимых гидрометрических рядов модели распределения стока выбираются по рекам-аналогам, имеющим такие данные.

Упомянутой приводкой отобранных сезонных объемов стока, хотя и мало отличающихся от расчетных объемов (по этому принципу и производится отбор), но все же неравноценных по величине, достигается сведение отобранных объемов стока к общему нормативу. Колебание же сроков каждого фактического сезона учитывается в построении диспетчерских линий (огibaющих) следующим образом. В тех случаях, когда высокий сток обуславливается довольно продолжительными дождями, которые могут многократно повторяться за сезон дождей, распределение высокого стока во времени, например при построении ветви наполнения противоперебойной линии, характеризуется верхней огibaющей кривых наполнения водохранилища, отражающей одновременно срок наступления половодья. Этот срок в указанных условиях лишь однозначно выделяется на диспетчерском графике в виде постоянного и связанного с календарем начала возможных проявлений высокого стока, чему соответствует календарная шкала времени.

С весенними половодьями дело обстоит иначе. Половодье не может повториться после расходования воды от снегозапасов; оно лишь перемещается во времени, чему соответствует скользящая шкала времени. С применением этой шкалы отсчеты вре-

мени при построении огибающих для ветвей диспетчерского графика ведутся не по календарю, а от различных в разные годы моментов начала весеннего подъема половодья. Кроме изложенных условий, являющихся исходными для построения диспетчерского графика, укажем еще одно обстоятельство, которое возникает в процессе построения и состоит в следующем.

При вычерчивании огибающих в отдельных случаях нельзя избежать частичного сглаживания некоторых точек на графике с соблюдением тенденции в направлении кривой. В частности, это относится к построению основной, наиболее ответственной линии графика – противоперебойной линии. В зависимости от требуемой обеспеченности, фактической длительности гидрометрических наблюдений, а значит, и числа отобранных моделей распределения стока маловодных сезонов крайние, резко отскакивающие от других точки или участки кривых могут иногда не приниматься во внимание. В отдельных случаях приходится допускать некоторое сглаживание кривых. Потребность в таких поправках вызывается малочисленностью выборки, которой мы обычно располагаем. По замечаниям С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [4], даже выборка из 50–60 членов не может исчерпывающе характеризовать различные очертания элементов волны половодья.

В некоторых случаях построение диспетчерских линий затрудняется в связи с нечеткостью хода сработки водохранилища в межень (с промежуточными заполнениями до НПГ в отдельные маловодные годы), что зависит от степени регулирования стока. При очень низких коэффициентах регулирования заполнение водохранилища во многие годы происходит и на протяжении межени. Для таких условий применение диспетчерских графиков теряет смысл, так как сработка емкости для задержания весеннего стока не может дать существенного эффекта, поскольку ее размеры незначительны по сравнению с суммарным стоком реки. В подобных случаях емкость практически можно использовать только для соблюдения отдачи во время провалов стока, а в остальное время водохранилище остается заполненным до НПГ. При этом емкость, отдача и другие водохозяйственные показатели определяются на основе статистической обработки результатов регулирования стока по ряду лет, как рекомендует, например, П. А. Ляпичев [5].

Контрольные вопросы

1. Какие причины обуславливают переход к переменной отдаче водохранилища?
2. В чем сущность специальных правил при переходе на переменную водоотдачу?
3. Охарактеризуйте в целом диспетчерский график.
4. Охарактеризуйте противоперебойную, противосбросовую линии, линии пониженной отдачи.
5. Опишите ход построения линий диспетчерского графика.

Глава 11 РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ДЛЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

11.1. Общие сведения и основные понятия

Гидроэлектростанция (ГЭС) производит электрическую энергию, используя энергию движущейся вниз воды (ее механическую работу) при переходе под напором из верхнего бьефа в нижний.

Для использования энергии потока необходимо в месте постройки ГЭС создать так называемое сосредоточенное падение, т. е. напор H – разность уровней воды выше и ниже ГЭС (рис. 23).

Существуют два основных типа гидроэлектрических станций: *приплотинные* и *деривационные*.

Для первого типа станций напор H создается плотиной, около которой или даже в ее теле располагается машинный зал, где находятся турбины, генератор и другое необходимое оборудование ГЭС. В последние годы в теле плотины размещаются горизонтальные капсульные агрегаты ГЭС, имеющие повышенный КПД вследствие минимальных гидравлических сопротивлений на входе и выходе воды при спрямленной всасывающей трубе.

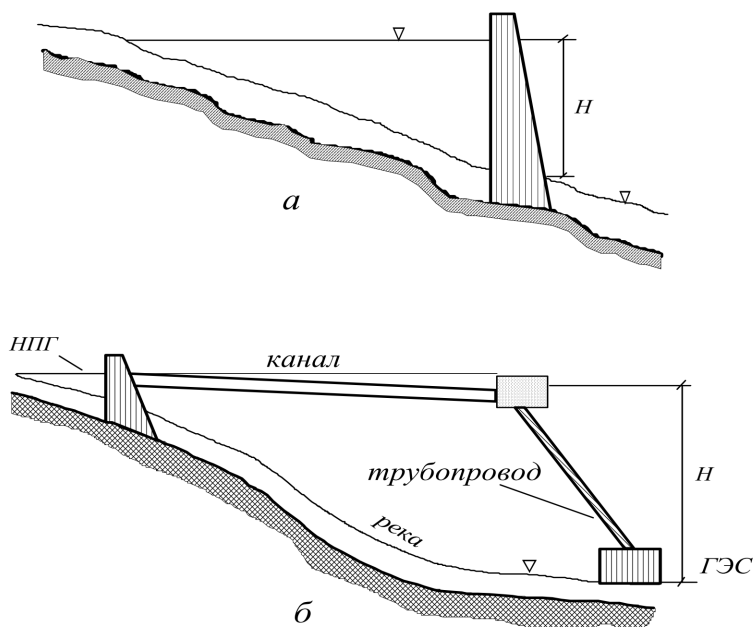


Рис. 23. Схема приплотинной (а) и деривационной (б) ГЭС

Для второго типа плотина устраивается выше по течению, откуда вода к ГЭС подводится по деривации – открытым каналом, тоннелем или трубопроводом. В этом случае напор создается разностью падения реки на том участке, в обход которого устраивается деривация, и падения канала. Часто целесообразно, чтобы плотина служила не только для отвода воды в канал, но и сама создавала дополнительный напор на сооружении. В таких конструкциях установки называются *плотинно-деривационными*.

Пройдя через турбины из верхнего бьефа в нижний, вода производит работу, равную JQH кгм/с, где J – вес 1 куб.м воды, кг.

Как известно, технической единицей мощности, т. е. работы за единицу времени, является 1 кВт = 102 кгм/с. Значит, мощность гидроэлектростанции в каждый момент определяется следующей зависимостью:

$$N = \frac{JQH}{102} \eta_T \eta_r = 9,81QH \eta_T \eta_r = AQH \text{ кВт},$$

где Q – расход, пропускаемый через турбины, куб.м/с.; H – полезный напор, определяемый как разность отметок верхнего и нижнего бьефов (с исключением потерь напора в подводящих сооружениях: решетках, трубопроводах и т. п.), при этом отметка верхнего бьефа находится по известной кривой объемов, а отметка нижнего - по кривой $Q = f(Z)$ или по расчету неустановившегося движения потока; $\eta_T = 0,85 - 0,95$ – коэффициент полезного действия (КПД) турбин; $\eta_G = 0,96 - 0,98$ – КПД генераторов; $A = 8,1 - 8,6$ – коэффициент для средних и крупных ГЭС, причем для очень мощных современных уникальных установок он может повышаться до 8,9 и снижаться до 6,5 – 7,5 для малых ГЭС с небольшими установками.

Выработка энергии определяется по известному соотношению:

$$M = NT \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где T – число часов работы ГЭС мощностью N кВт.

Гидроэлектрические станции среди всех энергетических видов установок, использующих естественно возобновляемые энергоресурсы (гидравлические, ветросиловые, приливные, геотермические и гелиоустановки), представляют наиболее важный вид энергетики.

Дополняя работу тепловых электростанций (ТЭС) и особенно компенсируя пиковые нагрузки, они составляют вместе с ними основные источники удовлетворения энергетических потребностей всех отраслей хозяйства страны.

Отсутствие затрат на добычу и транспортировку топлива и небольшое число эксплуатационного персонала обуславливает обычно меньшую себестоимость гидроэнергии по сравнению с энергией тепловых станций (ТЭС). Однако стоимость и сроки строительства гидроэлектростанций обычно в большинстве случаев бывают больше, чем у тепловых установок одинаковой мощности.

Гидроэлектростанции в ряде случаев являются экономически более выгодными или единственно возможными, а также имеют преимущества при работе в энергосистеме, в связи с чем играют большую и важную роль в энергетике нашей страны. Энергосистема, или совокупность объединенных электрической связью электростанций, покрывая общий график нагрузок всех

энергопотребителей, имеет техническое и экономическое преимущество по сравнению с независимо работающими электростанциями: повышение надежности энергоснабжения, уменьшение необходимой резервной мощности, себестоимости энергии и т. п. При этом ГЭС выполняют свойственные только им специфические функции, роль которых проявляется в следующем.

График суточных нагрузок энергосистемы обычно имеет пикобразную форму, в которой выделяются: сплошная нижняя часть – базисная и верхняя часть – пиковая (рис. 24). Базисная часть нагрузок энергосистемы покрывается в основном тепловыми электростанциями, а пиковая – гидроэлектрическими установками.

Работа тепловых станций в переменном режиме пиковых нагрузок нецелесообразна по ряду причин: длительный процесс введения агрегата в работу, затраты топлива на частую растопку котлов с последующим доведением их до рабочего состояния и т. д.

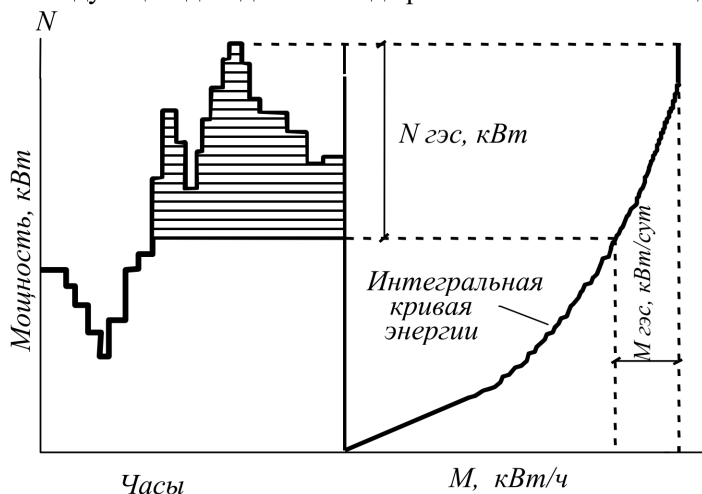


Рис. 24. Графическое определение обеспеченной части установленной мощности ГЭС с суточным регулированием

Этих недостатков гидроэлектростанция не имеет; для нее практически безразлично, какую часть графика нагрузок покрывать, изменение ее мощности происходит просто и весьма оперативно (гидроэнергоагрегат вводится в работу в течение 3-х минут и бесполезных потерь энергии не вызывает). Случайные

и аварийные нарушения в покрытии графика нагрузок энергосистемы устраняются ГЭС почти мгновенно, если на ней предусмотрены соответствующие запасы-резервы мощности (и воды на время ликвидации аварии). Таким образом, в отличие от других электростанций гидроэлектрические отличаются высокой маневренностью.

К тому же в многоводные годы и сезоны (например, в половодье), в том числе когда имеются излишки воды, ГЭС переводится целиком или частично на равномерную в течение суток работу для покрытия базисной части графика нагрузок.

При этом для покрытия пиковой части обычно необходима лишь работа части тепловых генерирующих станций, а остальные могут быть отключены на длительное время (на реконструкцию, плановый ремонт и др.) или работают всего только по несколько часов в течение одних суток.

11.2. Особенности суточного и недельного регулирования

11.2.1. Изменение уровня воды в нижнем бьефе

В течение суток при половодьях и паводках, за исключением случаев резкого нарастания и спада расходов, приток воды в пределах суток обычно остается достаточно равномерным. И если гидростанция не располагает бассейном (водохранилищем) суточного регулирования, то ее энергия используется в базисной, более полной части графика суточной нагрузки. В тех случаях, когда в отдельные часы нагрузка меньше мощности ГЭС, работающей в постоянном режиме на протяжении суток, часть стока вынужденно не используется и сбрасывается в виде холостых сбросов в нижний бьеф через водосливы. В другие же часы с энергопотреблением, превышающим выработку ГЭС, последняя не может быть полностью удовлетворена из-за нехватки воды.

В итоге на гидростанциях, не рассчитанных на суточное регулирование стока, неравномерное в течение суток энергопотребление по графику нагрузок, равное или даже несколько меньше выработки ГЭС, не может быть полностью удовлетворено в связи с тем, что суточные графики нагрузок имеют почти всегда пикообразную форму. При этом всегда покрывается лишь

нижняя часть графика в пределах мощности ГЭС по реальному стоку водотока.

По другому обстоит дело с использованием в этом случае специального бассейна аккумуляции, позволяющего перераспределять практически равномерный суточный приток соответственно неравномерному по часам энергопотреблению. Правда, при одном и том же значении расхода воды притока выработка электроэнергии ГЭС при суточном виде регулирования будет несколько меньше выработки без регулирования стока.

Подобное снижение энерговыработки при суточном регулировании стока происходит как за счет снижения среднего за сутки коэффициента полезного действия турбин при переменной нагрузке, так и за счет некоторого понижения уровня верхнего и повышения уровня нижнего бьефа в среднем за сутки. При большом числе турбин, допускающем наиболее благоприятный режим работы, этого снижения может и не быть совсем. Однако снижение энерговыработки при суточном регулировании обычно невелико даже на низконапорных установках (2–3%). С повышением напора это снижение уменьшается.

Энерговыработка ГЭС с суточным регулированием вливается в пиковую часть графика нагрузок всей энергосистемы. Этим достигается наибольшее вытеснение тепловых мощностей из системы и исключение их работы в той зоне графика, которая является для них неэкономичной.

Решение вопросов, связанных с гидроэнергетическими расчетами при суточном регулировании, сводится к определению обеспеченной мощности ГЭС, величины емкости регулирующего бассейна и учета колебаний уровня верхнего и нижнего бьефов.

Емкость бассейна суточного регулирования определяется графически с помощью анализирующей кривой. График почасовых нагрузок станции пересчитывается и перестраивается в график почасовых расходов. При этом расход для каждого часа находится постепенным приближением для заданных по часам мощностей с учетом изменения напора при колебании уровней обоих бьефов.

При этом используется известное соотношение

$$Q = \frac{N}{9,81 H \eta_r \eta_g},$$

где Q выражено в куб.м/с, N – в кВт, H – в м.

Неравномерное по часам суток потребление воды сопоставляется с равномерным притоком ее, подсчитываются недостающие (заимствуемые из бассейна) или избыточные (накапливаемые) объемы, и вычисляемые приращения суммируются в нарастающем порядке от часа к часу на протяжении суток.

Расчет начинается с момента, когда нагрузка ГЭС, постепенно повышаясь после ночного минимума, достигает среднесуточной величины. В этот момент бассейн заполнен полностью доверху. С указанного момента подсчитывается его опорожнение, которое заканчивается на спаде после вечернего максимума, когда нагрузка вновь достигает среднесуточной величины, а бассейн полностью расходуется. Затем в том же порядке подсчитываются наполнения водой бассейна.

Наибольшая емкость бассейна суточного регулирования определяется расчетом по суткам с высоким пиком нагрузки и относительно низкой ее среднесуточной величиной. Такое соотношение наблюдается в маловодные сутки того сезона, в течение которого требуется высокая пиковая мощность.

Изменения уровня верхнего бьефа при суточном виде регулирования стока определяются по кривой объемов бассейна, если последний в плане имеет округлую форму или значительную глубину. В вытянутых речных подпорных бьефах и в безнапорных деривационных каналах колебания уровня перед ГЭС не могут распространиться мгновенно на всю длину акватории. Если колебания уровня верхнего бьефа значительны, то они рассчитываются часто гидравлическими методами неустановившегося движения воды или излагаемым ниже упрощенным способом с учетом распространения волны повышения (положительная волна при уменьшении нагрузки ГЭС) или волны понижения (отрицательная волна при увеличении нагрузки ГЭС).

Изменение уровня вблизи гидростанции в начальный момент времени после изменения нагрузки ГЭС составляет:

для волны повышения –

$$+ \Delta Z = \frac{Q_1 - Q_2}{\lambda b},$$

для волны понижения –

$$- \Delta Z = \frac{2(Q_2 - Q_1)}{\lambda b},$$

где Q_1, Q_2 – расходы турбин соответственно до и после изменения нагрузки, м/с; b – средняя ширина участка акватории, на протяжении которого сможет распространиться возмущение уровня за время Δt работы ГЭС с измененной нагрузкой (Δt – продолжительность ступени графика нагрузок в секундах), м; λ – скорость распространения возмущений уровня, определяемая по приближенной формуле

$$\lambda = \mu \sqrt{gh_{cp}} - V_{cp}, \text{ м/с},$$

где g – ускорение силы тяжести, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; h_{cp} – средняя глубина участка длиной L м, в пределах которого возникают возмущения за время Δt ($L = \lambda \Delta t$), м; μ – коэффициент, зависящий от глубины и шероховатости участка возмущений и для обычных на равнинных реках бьефов со сравнительно небольшими подпорами равный $0,5\text{--}0,6$; V_{cp} – средняя скорость потока при установившемся режиме, м/с. Знак минус соответствует движению волны против течения в верхнем бьефе водохранилища (для нижнего бьефа учитывается знак плюс).

В конце участка (на расстоянии L от плотины) изменение уровня ориентировочно и приближенно можно принять равным нулю. При этом изменение объема бассейна за время Δt соответствует объему треугольного клина.

Для водохранилищ ГЭС, расположенных на равнине, колебания $\pm \Delta Z$ составляют обычно несколько сантиметров и в таких случаях при расчетах не учитываются.

Обычно неустановившееся движение воды в нижнем бьефе при суточном регулировании стока проявляется более резко. В этом случае при небольшом объеме воды, содержащейся в неподпертом или незначительно подпертом русле, колебания уровня у ГЭС достигают $1\text{--}2$ м и более, и постепенно затухая вниз по течению, распространяются на расстояние $50\text{--}70$ км и более.

Расчеты колебания уровней воды верхнего и нижнего бьефов выполняются для основных, наиболее главных характерных режимов работы ГЭС и направлены на необходимость установления тех или иных специфических условий (судоходство, лесо-

сплав, водозабор из реки и т. п.). Например, для зимних суток (декабрь–январь) расчет может потребоваться в связи с тем, что в этот сезон проходит максимум нагрузки и в то же время река подвержена стеснению ледяным покровом. Указанные причины вызывают наибольший подъем уровня воды, который в свою очередь может ограничить по напору располагаемую мощность ГЭС. В теплый сезон года детальный расчет колебаний уровней и расходов по протяжению нижнего бьефа имеет важное значение, в основном для судоходных рек.

Обобщая, можно сделать вывод о том, что расчеты неустановившегося движения воды в нижнем бьефе ГЭС, возникающего как результат суточного регулирования на ГЭС, производятся с целью:

а) определения колебаний уровней и расходов, а следовательно, глубин и скоростей вдоль всего нижнего бьефа (до места прекращения распространения колебаний), необходимых для выяснения условий судоходства на участке возмущений – глубины и скорости на перекатах, отметки уровня для сооружения причальных устройств и др.;

б) выявления влияния неустановившегося режима уровней воды непосредственно ниже гидроэлектростанции на ее энергетические параметры;

в) подробные характеристики и параметры затопления территории в условиях неустановившихся колебаний в нижнем бьефе при суточном регулировании стока.

Для выполнения необходимых расчетов требуются следующие исходные данные и материалы:

1. Суточный график нагрузок ГЭС (в киловаттах по часам суток), переводимый по ходу расчета в график расходов ГЭС. При этом изменение расхода является причиной неустановившегося режима нижнего бьефа.

2. Гидравлическая характеристика русла водотока.

3. Топографическая характеристика русла реки.

Для учета средней по каждому участку пропускной способности русла $K_{\text{ср}}$ общая расчетная протяженность нижнего бьефа делится на участки длиной l примерно от 2–3 км у плотины до 7–10 км в конце расчетной длины (всего 8–10 участков).

Для створов, ограничивающих каждый участок, строятся кривые зависимости расходов от уровней (деление на участки

производится с учетом расположения гидрометрических пунктов, из которых упомянутые кривые зависимости по связи уровней переносятся во все отдельные створы, где для этого должны быть организованы водомерные наблюдения).

Полученное таким образом семейство кривых (так называемая «ёлочка») позволяет определять для различных расходов соответствующие им концевые отметки уровня Z^I и Z^{II} и величины падения ΔZ по каждому участку по формуле (табл. 5):

$$\frac{K_{cp}}{\sqrt{l}} = \frac{Q_{cp}}{\sqrt{\Delta Z}} = \varphi(Z_{cp}).$$

Таблица 5

Расчет гидравлических характеристик

Q, куб.м/с	Z^I , м	Z^{II} , м	Z_{cp} , м	$\Delta Z = Z^I - Z^{II}$	$\sqrt{\Delta Z}$	$\frac{K_{cp}}{\sqrt{l}} = \frac{Q_{cp}}{\sqrt{\Delta Z}}$
40	66,57	66,32	66,45	0,25	0,51	79,1
80	66,92	66,65	66,79	0,27	0,52	154,0

Результаты расчета являются основой для графического изображения динамического уравнения потока, или уравнения равновесия, для каждого участка.

Для учета изменений русловых объемов с помощью морфометрических параметров определяется емкость каждого участка русла (как произведение полусуммы живых сечений по концам участка на длину последнего).

11.3. Сезонное (годовое) гидроэнергетическое регулирование

К категории водохозяйственных установок с более продолжительным регулированием, чем уже рассмотренное выше, относятся ГЭС, которые имеют емкость водохранилища, достаточную для увеличения мощности в наиболее важный сезон расчетного маловодного года или в напряженную по нагрузкам часть этого сезона. Естественно, в таком случае гидроэнергетические расчеты сводятся к определению зарегулированных рас-

ходов при сработке водоема за самый ответственный по нагрузкам период года.

Расчетный маловодный год при этом выбирается по величине стока межени и ее наиболее напряженной по нагрузкам части. При небольшом внутригодовом регулировании стока обеспеченность стока межени в расчетном маловодном году и особенно в ее наиболее ответственной части (например, зимой) должна быть несколько больше заданной обеспеченности мощностей. Техника расчетов для этого случая проста.

Годовым регулированием с полным или неполным использованием всего объема стока расчетного маловодного года (во втором случае имеются холостые сбросы воды весной) достигается значительное перераспределение мощностей соответственно потребности энергосистемы.

Величины емкости водохранилищ при годовом виде регулирования стока определяются по имеющемуся фактическому году наблюдений, общий сток которого, по крайней мере меженный, соответствует обеспеченности несколько большей, чем задано для мощностей.

В принятом для расчета году (с начала половодья до конца межени) пустое водохранилище должно заполниться к концу половодья с обязательной полной сработкой его к концу года. При этом желательно в фактическом ряду выявить возможность заполнения водохранилища в ближайшую весну.

Составление водного баланса и определение сработки или наполнения водохранилища производятся одновременно с гидроэнергетическими расчетами для каждого интервала времени (декады, месяцы).

Величина расхода воды, пропускаемого через турбины, а значит, и объем сработки или наполнения водохранилища определяются путем подбора для получения мощности, заданной или необходимой на этот интервал. Составление водного баланса и расчет отметки сработки или наполнения по каждому интервалу также производятся путем подбора.

Напор брутто определяется как разность уровней верхнего и нижнего бьефов (в нижнем бьефе уровни при расчете средней мощности устанавливаются по кривой зависимости горизонтов от расходов). Потери напора ΔH для подводящего и отводящего каналов учитываются на основании гидравлического расчета.

Пиковые напоры (а значит, и пиковые мощности) определяются для соответствующих пиковых расходов по имеющейся характеристике турбин $Q = f(H)$ и должны быть равны разности уровней верхнего и нижнего бьефов (за вычетом потерь ΔH).

Поскольку уровни нижнего бьефа определяются по кривой зависимости расходов от уровней, то определение пиковых напоров и соответствующих им расходов производится подбором с учетом ограничений характеристик турбин. Ограничения для турбин по минимальному напору и нагрузке также должны обязательно приниматься во внимание и учитываться.

11.4. Многолетнее гидроэнергетическое регулирование

Многолетний вид регулирования речного стока возникает в случаях, когда расчетный год полностью регулируется водохранилищем по потребностям энергосистемы без использования всей его полезной емкости. При многолетнем виде регулирования остается емкость, переходящая во время маловодья от одного года к другому, а полная сработка водохранилища происходит в этом случае в течение 2–3-х лет и более. Поэтому требуется выбирать не расчетный год, а *расчетный период*. Выбор его производится с использованием статистических параметров стока. Наполнение водохранилища к началу этого периода (как и после него) должно назначаться с учетом водности года, предшествующего периоду, причем наполнение может быть полным или частичным.

Обеспеченность стока за расчетный период должна приближаться (с небольшим превышением) к заданной обеспеченности мощностей. Определение последних производится так же, как и при годовом регулировании, т. е. последовательным уточнением расчетов исходя из предварительных соотношений между сезонными мощностями. Но при этом следует производить подбор не в одном году, а в расчетном n -лети, в течение которого водохранилище должно быть полностью сработано. После первого подбора сезонных мощностей уточняются соотношения между ними и выполняется повторное окончательное регулирование. Понятно, что мощности для соответствующих сезонов (месяцев) должны быть одинаковыми в каждом году расчетного периода сработки.

При недостаточности фактических данных о стоке и для контроля результатов, полученных по ряду стока, расчет многолетнего регулирования выполняется на основе теории вероятностей.

Надо отметить, что многолетнее энергетическое регулирование стока встречается редко, так как годовое регулирование дает достаточно высокие (из возможных) обеспеченные мощности, а при назначении на ГЭС установленной мощности значительно больше, чем обеспеченная среднесуточная, использование стока близко к полному. Правда, многолетнее регулирование несколько повышает обеспеченные мощности, но это бывает связано со значительными затоплениями и удорожанием гидроузлов. Кроме того, принципы многолетнего регулирования требуют и предусматривают, чтобы в водохранилище почти всегда сохранялась значительная многолетняя емкость (на случай наступления маловодного периода). Это приводит к тому, что в многоводные годы наблюдаются холостые сбросы воды. Даже в тех случаях, когда емкость позволяет выполнять многолетнее регулирование, оно не всегда оказывается выгодным. Окончательно решить вопрос о характере регулирования в таких случаях можно с помощью технико-экономических расчетов.

Контрольные вопросы

1. Назовите и охарактеризуйте основные типы ГЭС.
2. Нарисуйте схемы известных ГЭС.
3. Приведите формулу подсчета мощности ГЭС.
4. Напишите формулу подсчета выработки энергии ГЭС.
5. В чем заключается преимущество работы ГЭС в единой энергосистеме?
6. Объясните график определения обеспеченной части установленной мощности ГЭС с суточным регулированием.
7. Какие типы электростанций покрывают пиковые нагрузки электропотребления?
8. Для каких целей используется на ГЭС бассейн аккумуляции?

9. Назовите комплекс вопросов, связанных с гидроэнергетическими расчетами при суточном регулировании.

10. Охарактеризуйте, как определяются колебания уровня верхнего бьефа при суточном регулировании.

11. Для каких целей определяются колебания уровня в верхнем и нижнем бьефах?

12. Какие исходные данные требуются для расчетов колебания уровней в нижнем и верхнем бьефах?

13. Каким образом выбирается маловодный год при сезонном регулировании стока?

14. Охарактеризуйте расчетный период при многолетнем виде регулирования стока.

Глава 12

НЕЗАВИСИМОЕ И КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

12.1. Регулирование системой водохранилище–водозабор

Рассмотрим работу конкретного водохранилища, обеспечивающего водопотребление у водоприемника, расположенного ниже по течению реки и замыкающего дополнительный частный водосбор с незарегулированным существенным стоком и потому используемым в первую очередь. Как известно по определению, компенсирующее регулирование сводится к созданию необходимых добавок воды из водохранилища для нижерасположенного участка реки соответственно режиму промежуточного стока и водопотребления низовым водозабором.

При водопотреблении должны сохраняться расходы воды, пропускаемые для питания участка реки ниже водоприемника и называемые «санитарными» попусками. Размеры их зависят от характера использования реки и обычно принимаются близкими к естественному минимуму стока на этом участке (часто эти расходы составляют 95% обеспеченности), поскольку к нему при-

способлены население, другие водопользователи (учитывается величина потока, уровни заложения водозаборов и др.).

Сравнивая сток с нижнего частного водосбора и водопотребление, находим дефициты воды, которые представляются в виде графика попусков из водохранилища и рассматриваются как его полезная отдача, на которую оно рассчитывается. В маловодные периоды требуются большие попуски, а в многоводные они снижаются до нуля, так как сток с частного водосбора покрывает потребность.

В случаях размещения водоприемника на большом расстоянии от водохранилища при сопоставлении водопотребления и попусков следует учитывать время их добегания. Если они резко изменяются по сезонам, то требуется точная оценка моментов начала и конца попусков. Они должны начинаться до наступления периода с дефицитом воды у потребителя. К началу этого периода вода должна успеть добежать от водохранилища до водоприемника. Но в конце периода попусков они могли бы прекращаться несколько раньше, чем отпадет потребность подпитки водоприемника. Погрешности в определении этих моментов при отсутствии надежного прогноза стока приводят к расходованию лишней воды.

Если водохранилище обеспечивает попусками судоходные глубины на некотором участке реки, то расходование дополнительной воды оказывается неизбежным даже при точном прогнозе стока, поскольку время добегания воды до начального и до конечного сечений улучшаемого участка неодинаково. Объем излишне расходуемой воды равен попускам, заполняющим существующие русловые запасы этого участка.

Для работы водохранилища очень важно то, что размеры попусков находятся в непосредственной и притом обратной связи с водностью реки. Сток с регулируемого и частного водосборов колеблется приблизительно синхронно. Поэтому в маловодные годы из водохранилища требуется наибольшая отдача.

С уменьшением частного незарегулированного стока в маловодные годы дефицит увеличивается, а возможность покрытия его из водохранилища уменьшается, что вызывает необходимость в резком увеличении емкости водохранилища для устранения перебоев каждого дополнительного, более маловодного

года. Отмеченное совпадение низкого стока и возрастающего при этом потребления имеет большое значение при высокой обеспеченности водопользования.

Таким образом, при компенсирующем регулировании с высокой обеспеченностью поддержание обеспеченного водопользования должно быть обосновано гидрологической и водохозяйственной обстановкой по каждому конкретному маловодному году как в створе водопотребления, так и ниже по реке с учетом важности потребителей и восприимчивости их к перебоям.

Происходящее при компенсирующем виде регулирования стока резкое нарастание емкости водохранилища в самые маловодные годы по сравнению с емкостями для покрытия дефицитов в менее маловодные годы требует лишь тщательного рассмотрения условий каждого из весьма маловодных лет, но вовсе не является отрицательной стороной компенсирующего регулирования. Наоборот, этот вид регулирования при наличии значительного стока с промежуточного водосбора является вполне целесообразным и широко применяется на практике.

Преимущество такого вида регулирования состоит в том, что водохранилище обеспечивает у водозабора значительно большие (на 30–50%) величины гарантированных расходов, чем то же водохранилище с режимом попусков по жесткому графику. Если же расходы у водозабора оставить без изменения, то можно соответственно снизить емкость водохранилища.

12.2. Регулирование стока каскадом водохранилищ

Рассмотрим расчеты каскадного независимого регулирования по календарным рядам стока.

В настоящее время по многим речным бассейнам регулирование стока производится уже не изолированными водохранилищами, а каскадом их. Расчеты регулирования стока в каскаде водохранилищ можно выполнить табличным способом или по интегральным кривым стока, а также обобщенным методом.

Если применяется способ по интегральным кривым, то последние должны характеризовать общий сток со всего вышележащего водосбора до створа каждой плотины. Расчеты начинаются с самого верхнего водохранилища и последовательно

распространяются на нижележащие установки в порядке их расположения.

Нередко бывают случаи, когда в результате работы верхних установок даже с сезонным регулированием нижерасположенные водохранилища, несмотря на небольшие емкости, могут выполнять многолетнее регулирование. Но когда одно или несколько водохранилищ ведут многолетнее регулирование, расчеты выполняются по расчетному периоду лет соответственной степени многолетнего регулирования.

При больших расстояниях между створами каскада водохранилищ следует учитывать сдвиг стока по отдельным ступеням соответственно времени добегания. При этом за основу берут какой-то один створ, а в других створах границы сроков расчетных интервалов времени (декад, месяцев) сдвигаются. Так, если в трехступенном каскаде за основу взят нижний створ, а время добегания между створами *а* и *б* равно трем дням, между створами *б* и *в* – пяти дням, то при расчетах по среднедекадным расходам воды надо брать декады в створе *в* – с 21 по 30-е, в створе *б* – с 16 по 25-е и в створе *а* – с 13 по 22-е числа месяца.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте «санитарные» попуски из водохранилища.
2. Каким образом учитывается время добегания, если водозабор находится на большом расстоянии от плотины?
3. В чем заключается преимущество компенсирующего регулирования?
4. Какими способами можно выполнить расчеты регулирования каскада водохранилищ?
5. Каким образом учитывается сток, если водохранилища расположены на большом расстоянии друг от друга?

Литература

1. *Андреев В.Г.* Внутригодовое распределение речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 231 с.
2. *Андреев В.Г.* Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 179 с.
3. *Бахтияров В.А.* Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 431 с.
4. *Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.* Водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 176 с.
5. *Ляпичев П.А.* Методика регулирования речного стока. – М.: Госстройиздат, 1955. – 89 с.
6. *Плешков Я.Ф.* Регулирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 508 с.
7. *Потанов Л.В.* Регулирование стока. Т. 3. – М.: Сельхозгиз, 1951. – 123 с.
8. *Саваренский А.Д.* Регулирование речного стока водохранилищами. – М.: АН СССР, 1951. – 78 с.
9. *Hazen A.* Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply Transactions of A. S. C. E., 1914. – С. 7–5.

Содержание

Предисловие	3
Глава 1. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ УСТАНОВКИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОХРАНИЛИЩ	5
1.1. Режим работы установки	5
1.2. Водохранилища, их основные типы и характеристики	10
1.2.1. Емкостные и гидравлические характеристики	11
1.2.2. Характерные уровни и объемы	17
Глава 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ В РАСЧЕТАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА	25
2.1. Гидрометеорологические данные	25
2.2. Материалы гидрологической записки	28
2.3. Топографические характеристики водохранилища	33
2.4. Топографические характеристики участка реки	34
2.5. Прочие материалы	36
Глава 3. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА	38
3.1. Основные положения теории регулирования стока	38
3.2. Виды регулирования стока	40
3.3. Показатели регулирования стока	49
3.4. Основы методов расчета регулирования стока	51
Глава 4. ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИВЫХ СТОКА В ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТАХ	60
4.1. Интегральные кривые в прямоугольных координатах	60
4.2. Свойства интегральных кривых	62
4.3. Лучевой масштаб	64
4.4. Подсчет и построение интегральных кривых	66
Глава 5. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ КРИВЫМ ПРИ ЖЕСТКОМ ГРАФИКЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ	68

5.1. Расчеты регулирования стока на постоянный расход	68
5.1.1. Основные задачи расчетов регулирования стока	70
5.1.2. Сезонное регулирование	72
5.1.3. Многолетнее регулирование	77
Глава 6. ВИДЫ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА	80
6.1. Расчеты регулирования стока на ступенчатый график расходов	80
6.2. Баланс водохранилища, табличный способ расчета регулирования стока	83
Глава 7. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ НА ВОДОТОКАХ С ОЗЕРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ	87
Глава 8. ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ПЕРИОДА И РАСЧЕТНЫХ ЛЕТ	91
Глава 9. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ПОТРЕБЛЕНИЯ	95
Глава 10. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА НА ПЕРЕМЕННУЮ ОТДАЧУ	98
10.1. Определение и расчетные предпосылки	98
Глава 11. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ДЛЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	105
11.1. Общие сведения и основные понятия	105
11.2. Особенности суточного и недельного регулирования	109
11.2.1. Изменение уровня воды в нижнем бьефе	109
11.3. Сезонное (годовое) гидроэнергетическое регулирование	114
11.4. Многолетнее гидроэнергетическое регулирование	116
Глава 12. НЕЗАВИСИМОЕ И КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА	118
12.1. Регулирование системой водохранилище–водозабор	118
12.2. Регулирование стока каскадом водохранилищ	120
Литература	122

Учебное пособие

**Ивашкевич Геннадий Васильевич
Латкин Александр Сергеевич
Швецов Владимир Алексеевич**

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Редактор Г.Ф. Майорова
Технический редактор Е.Е. Бабух
Набор текста Г.В. Ивашкевич
Верстка Г.В. Ивашкевич, Е.Е. Бабух
Оригинал-макет Е.Е. Бабух

Лицензия ИД № 02187 от 30.06.00 г. Подписано в печать 14.04.2004 г.
Формат 61*86/16. Печать офсетная. Гарнитура Times New Roman
Авт. л. 5,98. Уч.-изд. л. 6,18. Усл. печ. л. 7,88
Тираж 60 экз. Заказ № 243

Редакционно-издательский отдел
Камчатского государственного технического университета

Отпечатано полиграфическим участком РИО КамчатГТУ
683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35