

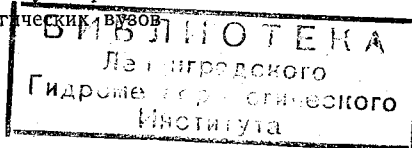
551.19

Б30

В. А. БАХТИАРОВ

# ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебника  
для государственных университетов  
и гидрометеорологических вузов



157213



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

ЛЕНИНГРАД • 1961

## АННОТАЦИЯ

В книге рассматриваются вопросы эффективного использования водных ресурсов в различных отраслях народного хозяйства и водохозяйственного строительства в СССР, теория и методы инженерного расчета регулирования стока и паводков, методы водноэнергетических расчетов. Освещаются последствия и мероприятия, связанные с образованием водохранилищ, и приемы оценки народнохозяйственной эффективности водохозяйственных мероприятий.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов гидрометеорологических вузов и университетов по специальности гидрология суши, а также может служить пособием для инженеров-гидрологов и гидротехников, занимающихся проектированием и эксплуатацией водохозяйственных установок и водохранилищ.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	7
<b>Глава 1. Водные ресурсы и водное хозяйство СССР . . . . .</b>	<b>9</b>
§ 1. Водные ресурсы СССР, их учет и народнохозяйственное значение . . . . .	9
§ 2. Основные направления использования водных ресурсов и связь их с природными и экономическими условиями . . . . .	17
§ 3. Комплексное использование водных ресурсов. Водопользователи и водопотребители . . . . .	20
§ 4. Вредные последствия неупорядоченной хозяйственно-производственной деятельности человека и охрана водных ресурсов . . . . .	23
§ 5. Задачи водного хозяйства . . . . .	27
§ 6. Водохозяйственное строительство . . . . .	31
Литература . . . . .	54
<b>Глава 2. Требования различных отраслей народного хозяйства на воду. Нормы и режим использования воды . . . . .</b>	<b>56</b>
§ 1. Водоснабжение . . . . .	57
§ 2. Орошение и обводнение . . . . .	64
§ 3. Энергетика . . . . .	78
§ 4. Водный транспорт . . . . .	87
§ 5. Рыбное хозяйство . . . . .	101
§ 6. Благоустройство населенных мест . . . . .	101
§ 7. Обеспеченность водоотдачи . . . . .	102
§ 8. Суммарное водопотребление при комплексном использовании . . . . .	106
Литература . . . . .	108
<b>Глава 3. Понятие о водохозяйственных расчетах. Водохозяйственные установки и водохранилища . . . . .</b>	<b>109</b>
§ 1. Предмет водохозяйственных расчетов . . . . .	109
§ 2. Речной сток как основа водохозяйственных расчетов . . . . .	111
§ 3. Развитие методики водохозяйственных расчетов . . . . .	115
§ 4. Назначение и типы водохозяйственных установок . . . . .	119
§ 5. Основные типы водохранилищ . . . . .	121
§ 6. Параметры водохранилищ . . . . .	122
§ 7. Потери воды из водохранилищ . . . . .	126
Литература . . . . .	144

	Стр.
Глава 4. Исходные данные водохозяйственного проектирования	146
§ 1. Гидрологические материалы	146
§ 2. Топографические материалы	152
§ 3. Прочие материалы	157
Литература	158
Глава 5. Основные положения теории регулирования стока. Расчеты регулирования по календарным гидрологическим рядам на жесткий график потребления	159
§ 1. Основные положения	159
§ 2. Виды регулирования стока	160
§ 3. Интегральные кривые стока как основа водохозяйственных расчетов	165
§ 4. Расчеты регулирования по интегральным кривым на жесткий график потребления	174
§ 5. Табличный способ расчетов регулирования стока — расчет баланса водохранилища	189
§ 6. Применение кривых продолжительности расходов к решению простейших задач сезонного регулирования стока	192
§ 7. Особенности водохозяйственных расчетов на водотоках с озерным регулированием	196
§ 8. Выбор расчетного периода и расчетных лет	198
Литература	200
Глава 6. Расчеты регулирования стока методами математической статистики на жесткий график потребления	201
§ 1. Условия применимости статистических методов расчета	201
§ 2. Первое приложение по применению статистических методов расчета	204
§ 3. Принципы строгого статистического расчета	207
§ 4. Метод расчета и графики Г. П. Иванова	219
§ 5. Учет коррелятивной связи между величинами годового стока	228
§ 6. Способы определения сезонной емкости водохранилищ	232
§ 7. Некоторые дополнительные характеристики режима работы водохранилищ	236
§ 8. Определение отдачи нетто	242
Литература	245
Глава 7. Расчеты регулирования по календарным гидрологическим рядам на переменную отдачу. Диспетчерские графики управления работой водохранилищ	246
§ 1. Основные положения	246
§ 2. Схема регулирования на наибольшее выравнивание стока	247
§ 3. Формы диспетчерских графиков и принципы их построения	251
§ 4. Диспетчерские графики при сезонном регулировании	260
§ 5. Диспетчерские графики при многолетнем регулировании	276
§ 6. Диспетчерские графики, регламентирующие использование избытков	280
§ 7. Использование прогнозов стока для повышения эффективности работы водохранилищ	285
Литература	287

	Стр.
<b>Глава 8. Распространение статистических методов расчета на различные формы водохозяйственного использования . . . . .</b>	<b>288</b>
§ 1. Основные положения . . . . .	288
§ 2. Расчеты регулирования по фазам годового цикла . . . . .	290
§ 3. Расчеты регулирования с учетом межфазовых коррелятивных связей . . . . .	294
§ 4. Расчеты регулирования на переменную отдачу с различной обеспеченностью . . . . .	302
§ 5. Расчеты регулирования на переменные оросительные нормы . . . . .	310
Литература . . . . .	314
<b>Глава 9. Водноэнергетические расчеты . . . . .</b>	<b>315</b>
§ 1. Основные положения . . . . .	315
§ 2. Водноэнергетические характеристики ГЭС . . . . .	320
§ 3. Основные характеристики режима электропотребления . . . . .	323
§ 4. Условия работы ГЭС . . . . .	325
§ 5. Установленная мощность ГЭС. Коэффициент использования стока . . . . .	327
§ 6. Характеристики турбин . . . . .	335
§ 7. Практические приемы водноэнергетических расчетов . . . . .	338
§ 8. Изменения уровней, вызываемые суточным регулированием . . . . .	342
§ 9. Гидроаккумулирующие установки . . . . .	347
Литература . . . . .	349
<b>Глава 10. Регулирование паводочного стока . . . . .</b>	<b>351</b>
§ 1. Задачи и средства регулирования паводочного стока . . . . .	351
§ 2. Условия допустимости расчетов регулирования паводочного стока по статической емкости водохранилища . . . . .	352
§ 3. Расчетные гидрографы . . . . .	353
§ 4. Общая схема расчетов регулирования паводочного стока по статической емкости водохранилища . . . . .	358
§ 5. Схемы упрощенных расчетов регулирования паводочного стока . . . . .	364
§ 6. Расчеты регулирования паводочного стока по динамической емкости водохранилища . . . . .	368
§ 7. Некоторые частные вопросы регулирования паводочного стока . . . . .	371
Литература . . . . .	374
<b>Глава 11. Каскадное независимое и компенсирующее регулирование . . . . .</b>	<b>376</b>
§ 1. Каскадное регулирование. Схемы каскадного регулирования . . . . .	376
§ 2. Расчеты каскадного независимого регулирования по календарным гидрологическим рядам . . . . .	378
§ 3. Приемы обобщенных расчетов каскадного независимого регулирования . . . . .	381
§ 4. Компенсирующее регулирование . . . . .	384
§ 5. Расчеты компенсирующего регулирования по календарным гидрологическим рядам . . . . .	387
§ 6. Расчеты компенсирующего многолетнего регулирования на основе обобщенного метода Г. П. Иванова . . . . .	391

	Стр.
§ 7. Гидрологические и водохозяйственные предпосылки для проведения электрического компенсирующего регулирования . . . . .	394
Литература . . . . .	403
Глава 12. Последствия образования водохранилищ. Оценка народнохозяйственной эффективности водохозяйственных мероприятий . . . . .	405
§ 1. Изменение уровня режима водотока в зоне подпора . . . . .	405
§ 2. Постоянные и временные затопления. Подтопление . . . . .	407
§ 3. Переработка берегов и оползневые явления . . . . .	411
§ 4. Изменение общесанитарной и малярийной обстановки в зоне водохранилища . . . . .	411
§ 5. Подготовка чаши водохранилища к затоплению . . . . .	412
§ 6. Защитные мероприятия . . . . .	414
§ 7. Изменение гидрологического режима в нижнем бьефе сооружений под влиянием регулирования стока и связанные с ним последствия и мероприятия . . . . .	415
§ 8. Народнохозяйственные ущербы, обусловленные созданием водохранилищ . . . . .	418
§ 9. Оценка народнохозяйственной эффективности водохозяйственных мероприятий . . . . .	420
Литература . . . . .	428
Приложения . . . . .	
Таблица I. Отклонения ординат биномиальных асимметричных кривых обеспеченности от середины (от 1,0) при $C_v = 1,0$ . . . . .	429
Таблица II. Ординаты биномиальных асимметричных кривых обеспеченности при $C_s = 2 C_v$ . . . . .	430

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В курс «Водохозяйственные расчеты», читаемый в гидрометеорологических институтах и университетах по специальности «Гидрология суши» в последние годы были включены также и проблемы водного хозяйства, что вызвано необходимостью более тесной увязки водохозяйственных расчетов с задачами, которые возникают при разработке проекта любого водохозяйственного мероприятия в отношении эффективного комплексного использования водных ресурсов.

В основу настоящего курса положены лекции, читаемые автором в течение ряда лет, и его научная работа в Ленинградском гидрометеорологическом институте, а также его многолетняя производственная работа в Ленинградском отделении института Гидроэнергопроекта. При составлении курса также использована обширная литература и периодические издания, посвященные как водным ресурсам и их использованию, так и методике водохозяйственных и водноэнергетических расчетов. Курс составлен в соответствии с программой, утвержденной Министерством высшего и среднего специального образования.

Автор стремился создать у читателя представление о характере водных ресурсов СССР и их использовании в соответствии с природными особенностями и экономическим развитием отдельных районов страны. На примерах осуществленного и ведущегося водохозяйственного строительства показано, что в условиях планового социалистического хозяйства наиболее высокий народнохозяйственный эффект достигается лишь при комплексном использовании водных ресурсов.

Излагая методику регулирования стока и паводков и методику водноэнергетических расчетов, автор приводит в основном методы, имеющие в настоящее время преимущественное распространение в практике проектирования.

Поскольку книга предназначена для достаточно квалифицированного читателя — студентов институтов и университетов, а также инженеров, в ней излагаются и некоторые методы, хотя и менее употребительные, но представляющие большой теоретический интерес (глава 8). Знакомство с этими методами

будет способствовать расширению теоретического и технического кругозора студентов.

При изложении теории регулирования стока автор исходил из той предпосылки, что методы расчетов, вообще говоря, не находятся в прямой зависимости от направления использования водных ресурсов (орошение, водный транспорт и др.), а связаны главным образом с видом регулирования (многолетнее, сезонное и т. д.). Имеются, конечно, отдельные задачи, которые решаются специально разработанными для них методами, в частности метод расчета регулирования стока на переменные оросительные нормы (М. В. Потапов). Таких задач, однако, очень мало.

В последней главе книги рассматриваются явления, сопутствующие образованию водохранилищ, и даются приемы оценки народнохозяйственной эффективности водохозяйственных мероприятий.

Принятая последовательность изложения материала соответствует ходу проектирования водохозяйственных мероприятий, что должно способствовать созданию четкого и законченного понимания основных положений водного хозяйства и водохозяйственных расчетов.

Автор с признательностью примет замечания по содержанию книги и ее изложению.



## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО СССР

#### § 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ СССР, ИХ УЧЕТ И НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Водные ресурсы, включая поверхностный и подземный сток, принадлежат к природным богатствам, жизненно необходимым для человека и народного хозяйства. При этом, в отличие от других природных богатств, например запасов полезных ископаемых (уголь, руда и др.), месторождения которых в результате добычи истощаются, водные ресурсы непрерывно возобновляются.

По территории водные ресурсы распределены неравномерно и изменяются по времени.

Насыщенность того или иного района водными ресурсами обуславливается физико-географическими условиями: климатом, рельефом, геологическим строением, характером почв, растительным покровом. Из климатических факторов, как известно, наибольшее значение имеют осадки и испарение.

На количество выпадающих осадков большое влияние оказывает удаленность местности от водных пространств — океанов и морей, считая по направлению господствующих ветров, а также рельеф. Даже небольшие возвышенности Европейской равнины являются конденсаторами осадков на своих наветренных склонах. Увеличение осадков с высотой местности более заметно в горных и приморских районах.

Близость водных пространств не всегда определяет большое количество осадков на прилегающих частях материка. Характерным в этом отношении является пример с восточным побережьем Черного моря, обильно орошаемым осадками (до 2500 мм в год и более), и с Арало-Каспийской низменностью, являющейся одним из самых засушливых районов СССР. Такое положение объясняется в основном тем, что вдоль Черноморского побережья тянется Главный Кавказский хребет, задерживающий влагу, приносимую воздушными массами с моря. Испа-

ряющаяся же влага с Каспийского моря поднимается на большую высоту и далеко уносится воздушными течениями в Западную Сибирь и горные районы Средней Азии.

В среднем для всей территории СССР среднемноголетний слой годовых осадков составляет 400 мм. Для отдельных крупных бассейнов он находится в пределах от 220 мм (бессточные области Аральского моря и Средней Азии) до 630 мм (бассейн Балтийского моря). Для меньших бассейнов годовые осадки изменяются в более значительных пределах.

Основную часть водных ресурсов составляют поверхностные воды — реки и озера.

Все реки и озера нашей страны принадлежат или к бассейнам морей, связанных с океанами, или к бассейнам морей (точнее, озер), образующих области внутреннего стока. Общая площадь бассейнов первой группы составляет 77,3% всей площади СССР, а второй группы — 22,7%. Бассейны первой группы относятся к следующим океанам: Северному Ледовитому — 54,1% общей площади СССР, Тихому — 14,8% и Атлантическому — 8,4%.

Водный баланс бассейнов морей и всей территории СССР, вычисленный П. С. Кузиным и приведенный в ряде работ [1, 2] и др., характеризуется следующими величинами (табл. 1.1).

Данные таблицы показывают, что наибольшим стоком характеризуются бассейны Баренцева и Белого морей, Берингова, Охотского, Японского и Балтийского морей, наименьшим — область внутреннего стока Средней Азии. Малым стоком характеризуется бассейн Каспийского моря, а также бассейны Черного и Азовского морей.

Для всей территории СССР в целом средний слой стока равен 180 мм.

Основная часть среднего годового стока СССР, как и площади, принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана — соответственно 60,2 и 54,1%. Хотя по площади области внутреннего стока занимают почти четвертую часть (22,7%) всей территории СССР, по объему годового среднего многолетнего стока их доля составляет лишь одну десятую часть (10,3%) суммарного стока СССР. Таким образом, области внутреннего стока нашей страны очень бедны водными ресурсами, что обуславливается небольшими осадками и большим испарением.

Суммарный объем годового среднего многолетнего стока СССР равен 3,9 тыс. км<sup>3</sup>, что составляет свыше 10% суммарного стока рек земного шара, оцениваемого в 37 тыс. км<sup>3</sup>.

Советский Союз обладает огромным количеством рек — около 780 тыс., в том числе 100 тыс. рек длиной более 10 км. Такого количества рек нет ни в одной другой стране мира. Общее протяжение рек составляет 5,1 млн. км, из них рек длиной более 10 км — 3 млн. км. Количество озер более 250 тыс. Гу-

Таблица 1.1

Бассейн моря	Площадь бассейна		Осадки, мм	Сток, мм	Испарение, мм	Сток	
	тыс. км <sup>2</sup>	% от площади СССР				тыс. км <sup>3</sup>	% от стока СССР
<b>Северный Ледовитый океан</b>							
Баренцева и Белого . . . . .	1 000	4,6	500	350	150	0,35	9,0
Карского . . . . .	6 100	28,2	420	190	230	1,15	29,4
Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского . . . . .	4 600	21,3	290	190	100	0,85	21,8
Итого . . . . .	11 700	54,1				2,35	60,2
<b>Атлантический океан</b>							
Балтийского . . . . .	600	2,8	630	260	370	0,15	3,9
Черного и Азовского . . . . .	1 200	5,6	550	130	420	0,15	3,8
Итого . . . . .	1 800	8,4				0,30	7,7
<b>Тихий океан</b>							
Берингова, Охотского и Японского . . . . .	3 200	14,8	500	270	230	0,85	21,8
<b>Области внутреннего стока</b>							
Каспийского . . . . .	2 900	13,4	400	100	300	0,30	7,7
Область внутреннего стока Средней Азии . . . . .	2 000	9,3	220	50	170	0,10	2,6
Итого . . . . .	4 900	22,7				0,40	10,3
Всего по СССР . . . . .	21 600	100,0	400	180	220	3,90	100,0

стога речной сети в лесной зоне составляет 200—350 м, в степной — 70—15 м, в засушливых районах Средней Азии — 10 м и менее на 1 км<sup>2</sup>.

Среди рек СССР наибольшей водоносностью обладают реки, принадлежащие к бассейну Северного Ледовитого океана: Енисей со средним многолетним расходом 17 400 м<sup>3</sup>/сек, Лена — 15 500 м<sup>3</sup>/сек, Обь — 12 500 м<sup>3</sup>/сек и др. Большую водоносность

имеют также Амур (11 000 м<sup>3</sup>/сек, бассейн Тихого океана), Волга (8000 м<sup>3</sup>/сек, бассейн Каспийского моря) и т. д. Четыре наиболее крупные реки СССР — Енисей, Лена, Обь и Амур — находятся в числе 15 самых многоводных рек мира, из которых Енисей занимает восьмое, а Лена — девятое место.

Наша страна богата также и подземными водами. По вычислениям академика В. И. Вернадского, в земной коре примерно столько же воды, сколько ее в Мировом океане. Однако подземных вод, находящихся в состоянии, доступном для использования, значительно меньше, чем поверхностных.

Запасы подземных вод имеются повсеместно. В зависимости от местных геологических и гидрогеологических условий подземные воды находятся на разных глубинах от земной поверхности и количество их различно.

Велики в нашей стране и запасы водной энергии — гидроэнергетических ресурсов. Водная энергия также относится к непрерывно возобновляющимся ресурсам. Запасы водной энергии определяются двумя факторами — водоносностью рек и высотой падения.

Как видно из предыдущего, водоносность рек весьма различна, различно также и их падение. Поэтому запасы водной энергии рек значительно отличаются. Очень большие гидроэнергетические ресурсы равнинных рек — Волги, Оби и др., средние падения которых составляют соответственно 7 и 4 см на 1 км, определяются их огромной водоносностью, в то время как для горных рек, обладающих сравнительно небольшими расходами воды, определяются их большими падениями. Такие реки, как Енисей, Ангара и др., обладают исключительно большими гидроэнергетическими ресурсами как вследствие большой водоносности, так и их сравнительно больших падений. Хотя водоносность Волги и больше водоносности Индигирки в 4,5 раза, а Ангара в 1,9 раза, запасы водной энергии ее одинаковы с запасами Индигирки и в 1,6 раза меньше запасов Ангара. По сравнению с Енисеем водоносность Оби лишь в 1,4 раза меньше; по гидроэнергетическим же ресурсам Обь меньше Енисея в 3,2 раза.

Потенциальные гидроэнергетические ресурсы оцениваются двумя показателями: средней многолетней мощностью и средней годовой выработкой энергии, определяемых для каждого участка реки по формулам (подробно см. главу 9):

$$N = 9,81QH \text{ квт},$$

$$E = 86400QH \text{ квт-ч}.$$

Здесь  $Q$  — среднеарифметический из средних многолетних расходов в м<sup>3</sup>/сек на концах участков, по которым ведется подсчет ресурсов;  $H$  — разность уровней (падение) в метрах на концах участков, взятых с продольного профиля водотока.

Гидроэнергетические ресурсы для всей реки (от истока до устья) определяются суммированием данных по отдельным участкам ее.

Границы расчетных участков выбираются в характерных местах — в точках изломов продольного профиля и графика нарастания расходов по длине реки.

Для характеристики насыщенности территории гидроэнергетическими ресурсами, помимо суммарных показателей, применяют удельные показатели, отнесенные к 1 км<sup>2</sup> площади. Последние получают делением средней мощности или годовой выработки энергии на площадь и измеряются соответственно в квт/км<sup>2</sup> и квт-ч/км<sup>2</sup>.

В докладе А. Н. Вознесенского на III Всесоюзном гидрологическом съезде (1957 г.) приведены данные подсчетов потенциальных гидроэнергетических ресурсов, выполненных институтом Гидроэнергопроект в 1950 г. (по 1477 рекам) [3].

Результаты этих подсчетов по бассейнам и по территории отдельных республик СССР помещены в табл. 2.1 и 3.1.

Таблица 2.1

Бассейн (территория)	Гидроэнергетические ресурсы			Насыщенность территории гидроэнергетическими ресурсами, тыс. квт-ч на 1 км <sup>2</sup>
	млн. квт	млрд. квт-ч	% от итога по СССР	
Северный Ледовитый океан . . .	187,6	1643	55,2	
Атлантический океан . . . . .	21,6	189	6,3	
Тихий океан . . . . .	40,1	352	11,8	
Области внутреннего стока . . .	90,7	794	26,7	
Всего по СССР . . . . .	340,0	2978	100,0	133,7
В том числе:				
Европейская территория и Кавказ	60,0	528	17,7	104,6
Азиатская территория . . . . .	280,0	2450	82,3	143,0

Если распространить подсчет на всю территорию СССР, используя для этого сведения о величинах среднего речного стока и о высотных характеристиках отдельных районов, то вероятные запасы потенциальных гидроэнергетических ресурсов повысятся примерно на 25% и составят: по мощности 420 млн. квт и по выработке энергии 3680 млрд. квт-ч.

Таблица 3.1

Союзная республика	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Гидроэнергетические ресурсы			Насыщенность территории гидроэнергетическими ресурсами, тыс. квт-ч на 1 км <sup>2</sup>
		млн. квт	млрд. квт-ч	% от итога по СССР	
РСФСР . . . . .	17 100	249,2	2 183	73,3	127,7
Украинская . . . . .	577	5,0	44	1,5	76,6
Белорусская . . . . .	208	0,6	6	0,2	26,8
Узбекская . . . . .	407	7,1	62	2,1	153,4
Казахская . . . . .	2 754	15,0	132	4,4	47,9
Грузинская . . . . .	76	11,1	97	3,3	1277,9
Азербайджанская . . . . .	86	3,8	33	1,1	391,3
Литовская . . . . .	65	0,4	4	0,1	58,6
Молдавская . . . . .	34	0,4	3	0,1	95,2
Латвийская . . . . .	64	0,6	5	0,2	83,0
Киргизская . . . . .	197	15,2	133	4,5	677,3
Таджикская . . . . .	143	26,8	235	7,9	1649,1
Армянская . . . . .	30	1,7	15	0,5	493,6
Туркменская . . . . .	485	2,7	24	0,8	48,8
Эстонская . . . . .	45	0,1	1	0,1	13,2
Всего по СССР . . . . .	22 270	340,0	2 978	100,0	133,7

Таблица 4.1

Река	Какому бассейну принадлежит	Гидроэнергетические ресурсы	
		млн. квт	млрд. квт-ч
Лена	Моря Лаптевых . . . . .	18,4	161
Енисей	Карского моря . . . . .	18,2	160
Ангара	Енисея . . . . .	9,9	86
Амур	Охотского моря . . . . .	6,4	56
Индигирка	Восточно-Сибирского моря . . . . .	6,2	54
Волга	Каспийского моря . . . . .	6,2	54
Нарын	Сыр-Дарьи . . . . .	5,9	52
Пяндж	Аму-Дарьи . . . . .	5,8	51
Обь	Карского моря . . . . .	5,7	50

Из приведенных данных видно, что основная часть гидроэнергетических ресурсов (55,2%) сосредоточена в бассейне Северного Ледовитого океана. На долю области внутреннего стока (Арало-Каспий) приходится несколько более четверти (26,7%) всех ресурсов страны.

Первое место по запасам гидроэнергетических ресурсов занимает РСФСР — на ее территории сосредоточено почти  $\frac{3}{4}$  всех запасов гидроэнергоресурсов СССР. Второе место занимает Таджикская ССР (7,9%), третье — Киргизская (4,5%), четвертое — Казахская (4,4%) и т. д. Незначительными ресурсами располагают Литовская ССР, Молдавская ССР, Эстонская ССР (по 0,1%), Белорусская ССР, Латвийская ССР (по 0,2%) и др.

Очень большие гидроэнергетические ресурсы сосредоточены в бассейнах рек, приведенных в табл. 4.1.

Наибольшей концентрации гидроэнергетические ресурсы достигают на территории Таджикской ССР, где на 1 км<sup>2</sup> площади приходится 1650 тыс. квт-ч, в то время как на территории Эстонской ССР насыщенность гидроэнергоресурсами составляет лишь 13 тыс. квт-ч, т. е. в 127 раз меньше. По насыщенности гидроэнергоресурсами второе место занимает Грузинская ССР (1280 тыс. квт-ч), третье Киргизская ССР (677 тыс. квт-ч), четвертое — Армянская ССР (494 тыс. квт-ч), пятое — Азербайджанская ССР (391 тыс. квт-ч). В среднем для всей территории СССР насыщенность гидроэнергоресурсами составляет 133,7 тыс. квт-ч на 1 км<sup>2</sup> площади.

По техническим и экономическим причинам имеющиеся гидроэнергетические ресурсы полностью не могут быть использованы. По произведенным в СССР подсчетам, технически возможно использовать в среднем для всей страны около 50% теоретических потенциальных гидроэнергоресурсов.

В общих мировых запасах гидроэнергии на долю СССР приходится 11,4% (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Континент (страна)	Гидроэнергетические ресурсы			Насыщенность территории гидроэнергоресурсами, квт-ч на 1 км <sup>2</sup>
	млн. квт	млрд. квт-ч	процент от итога по земному шару	
Европа . . . . .	240	2 100	6,4	25
Азия . . . . .	1 340	11 750	35,7	30
Африка . . . . .	700	6 150	18,7	23
Северная Америка . . . . .	700	6 150	18,7	34
Южная Америка . . . . .	600	5 250	16,0	33
Австралия . . . . .	170	1 500	4,5	19
Земной шар . . . . .	3 750	32 900	100,0	28
СССР . . . . .	420	3 700	11,4	19

Данные таблицы показывают, что на Азиатском континенте сосредоточено почти 36% мировых запасов гидроэнергии.

По запасам гидроэнергии Советский Союз оставляет позади любое капиталистическое государство. По наиболее сопоставимым данным, характеризующим ресурсы технически возможные к использованию (табл. 6.1), гидроэнергетические ресурсы СССР в два с лишним раза превышают запасы гидроэнергии США и Канады, вместе взятые.

Таблица 6.1

Страна	Гидроэнергетические ресурсы млрд. квт-ч	Насыщенность территории гидроэнергетическими ресурсами, тыс. квт на 1 км <sup>2</sup>	Насыщенность гидроэнергетическими ресурсами на одного жителя, тыс. квт-ч
СССР . . . . .	1720	78,0	8,6
США с Аляской . . . . .	491	52,4	2,9
Канада . . . . .	218	21,9	14,0
Франция . . . . .	65	110,0	1,4
ФРГ . . . . .	16	64,5	0,3
Япония . . . . .	103	277,6	1,1
Швеция . . . . .	80	178,2	10,9
Норвегия . . . . .	100	308,2	29,4
Италия . . . . .	55	182,5	1,1
Австрия . . . . .	40	476,2	5,7

Водные ресурсы, являясь ценнейшими природными богатствами, требуют особенно тщательного учета, без которого невозможно правильное планирование их использования в интересах гармоничного развития народного хозяйства СССР.

Для обеспечения надежного планирования использования водных ресурсов и удовлетворения повседневных запросов проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений и водохранилищ прежде всего требуется наличие данных гидрологических наблюдений на реках и озерах.

Получение таких сведений возможно только на основе организации постоянной сети наблюдательных пунктов, обеспечивающих накопление данных и текущую информацию о состоянии водных объектов.

В различных районах СССР в настоящее время действует около 8000 стационарных пунктов гидрологических наблюдений. В различных физико-географических районах СССР создан также ряд стоковых станций, располагающих специальным оборудованием и приборами, на которых ведутся исследования процессов испарения с водной поверхности, испарения с почвы, транспирации с различных видов растительности, просачивания воды в почву, поверхностного стекания и подземного питания, снеготаяния и др. и в целом процесса формирования стока на речном водосборе в связи с различными физико-географическими факторами и с агролесомелиоративными мероприятиями.



Кроме того, проводятся большие экспедиционные работы по сбору дополнительных гидрологических материалов, которые по каким-либо причинам не обеспечиваются сетью наблюдательных и стоковых станций. Экспедиции обычно направляются в слабо изученные в гидрологическом отношении районы для выявления водных ресурсов (в частности, на целинных и залежных землях), исследования специальных явлений (образование селей и др.), вопросов влияния деятельности человека на гидрологический режим водных объектов и т. д.

Уже закончены продолжавшиеся ряд лет работы по изучению водных ресурсов юго-западной Туркмении, Северного Казахстана и районов Алтая.

Большую работу по обобщению гидрологических наблюдений и по выявлению водных ресурсов проводит Государственный гидрологический институт (ГГИ).

Накопленные по 1935 г. сведения по стоку и наносам ГГИ обобщил в виде «Материалов по режиму рек СССР». Ими охвачен период наблюдений с 1881 по 1935 г. За последующие годы аналогичные сведения публикуются в гидрологических ежегодниках. К концу 1959 г. издано около 300 таких ежегодников.

В последнее время началось издание материалов стоковых, испарительных, озерных, болотных и других специальных станций.

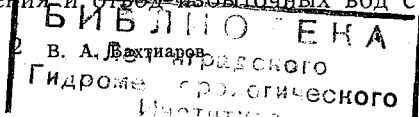
Большую работу по учету водных и водноэнергетических ресурсов ведут проектные институты — Гидроэнергопроект, Гидропроект и другие организации, в частности академии наук союзных республик.

Значение водных ресурсов для нашей страны огромно. Богатство этих ресурсов создает предпосылки для всестороннего их использования, удовлетворения питьевых, санитарных и хозяйственных нужд населения, сельского хозяйства, промышленности, энергетики, транспорта и других разнообразных народнохозяйственных потребностей.

## § 2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И СВЯЗЬ ИХ С ПРИРОДНЫМИ И ЭКОНОМИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Современное использование водных ресурсов осуществляется по ряду довольно четко определившихся основных направлений. Эти направления, или отрасли водного хозяйства, следующие:

- 1) водоснабжение населенных мест и предприятий промышленных, сельскохозяйственных, транспортных и энергетических (тепловых и атомных электростанций);
- 2) мелиорации — использование воды для орошения и обводнения и отвод избыточных вод с территории (осушение);



3) гидроэнергетика — использование энергии воды;

4) водный транспорт — использование воды для судоходства и лесосплава;

5) использование водных недр — добыча из воды солей, водорослей, разведение и лов рыбы и пр.

Помимо пользы, вода как стихия может наносить вред населению и народному хозяйству, например, при наводнениях, вызываемых паводками. Вода может деформировать русла рек и разрушать их берега, заносить территорию наносами при разливах рек, смывать плодородный слой почвы и разрушать территорию оврагообразовательной деятельностью (водная эрозия) и т. п.

Борьба с вредными и разрушительными действиями воды также составляет одну из основных отраслей водного хозяйства.

Кроме перечисленных основных отраслей водного хозяйства, необходимо указать на использование вод в санитарных целях, включая борьбу с очагами малярии (осушением или затоплением заболоченной местности, зараженной личинками комара), для благоустройства населенных мест, спорта, обороны страны и т. п.

Большинство направлений использования водных ресурсов обслуживает несколько отраслей народного хозяйства. Таковы, например, водоснабжение, гидроэнергетика, водный транспорт. Оросительные и осушительные мероприятия в основном необходимы сельскому хозяйству, но они имеют большое значение и в промышленности, строительстве, коммунальном хозяйстве (осушение для торфоразработок, подготовка строительных площадок, обводнение парков и т. д.).

Направление использования водных ресурсов и технические решения, связанные с этим, определяются главным образом естественнo-историческими условиями и специализацией народного хозяйства района влияния намечаемого к использованию водного объекта.

Для районов, бедных осадками, и для районов с неблагоприятным их внутригодовым распределением, например Средней Азии, Крыма, Закавказья и др., решающим является использование водных ресурсов для сельскохозяйственного орошения и обводнения. Казахская ССР, например, характеризующаяся благоприятными почвенными условиями и большим количеством тепла, страдает от недостатка влаги. Значительная часть ее территории расположена в зоне полупустынь и ограничена на севере степными равнинами и на юге пустынями и горными хребтами. Количество осадков от 300 мм в год на севере уменьшается в центральных областях до 200 мм и на юге до 100 мм. Сельское хозяйство здесь поэтому возможно лишь при искусственном орошении.

В ряде районов (юг Украины, Курская область, Кулундинская степь и др.) недостаток осадков наблюдается главным образом в засушливые годы. За 63 года — с 1887 по 1950 г. на юге Украины было 22 засушливых года, которые пагубно отразились на сельскохозяйственном производстве. В этих районах основным также является использование водных ресурсов для оросительных мероприятий, особенно в засушливые годы.

В районах с избыточным увлажнением, например в Белоруссии, Прибалтике, северо-западных и северных областях Европейской территории СССР и др., одним из основных вопросов водного хозяйства является осушение. Осушение болот и заболоченных земель создает предпосылки для расширения посевных площадей, повышения урожайности сельскохозяйственных культур, развития животноводства и т. д.

Нередко в пределах одного и того же географического района необходимо проведение мероприятий как по дополнительному увлажнению почвы — орошению, так и по осушению. Например, в Армянской ССР, поверхность которой располагается на резко различающихся высотах (от 400 до 4000 м над уровнем моря), ясно выражено вертикальное чередование природных зон. Сельское хозяйство там ведется не только в долинах рек, но и на склонах гор с абсолютными отметками до 2200—2400 м.

При этом в отдельных местах орошаемые земли лежат на высоте 2200 м. Параллельно с широким распространением оросительных мероприятий в Армении в долинах рек Раздана, Аракса и др. проводятся работы по осушению заболоченных земель. И в некоторых других республиках нашей страны — Грузинской, Азербайджанской и т. д. наряду с районами, где без искусственного орошения сельское хозяйство невозможно или малопродуктивно, имеются районы с избыточно увлажненными почвами, требующими осушения. Так, в восточной части Грузинской ССР, характерной недостаточностью осадков (от 400 до 800 мм в год) и неблагоприятным их внутригодовым распределением, для получения высокого и устойчивого урожая сельскохозяйственных культур проводится орошение. В то же время в западной ее части (в особенности на побережье Черного моря и примыкающих к нему районах), характерной обилием осадков (от 1000 до 2500 мм), образовались обширные болота (Колхида), нуждающиеся в осушении.

В районах с большими запасами гидроэнергетических ресурсов, хозяйственное развитие которых идет по пути индустриализации, электрификации железнодорожного транспорта и т. д., к каким следует отнести Сибирь, Северо-Запад Европейской территории СССР и др., основным направлением использования водных ресурсов является гидроэнергетика.

В районах с муссонным климатом (Дальний Восток), страдающих от частых и разрушительных наводнений, одной из

основных отраслей водного хозяйства является борьба с наводнениями.

В других природных и экономических условиях основным направлением использования водных ресурсов может быть водоснабжение, водный транспорт, рыбоводство, санитарное благоустройство и т. п.

### **§ 3. КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ. ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛИ И ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ**

Стремление получить от природных богатств наибольший народнохозяйственный эффект приводит к принципу комплексного использования водных ресурсов.

Комплексным называется такое использование водных ресурсов, при котором одновременно и притом наиболее целесообразно и с наименьшими затратами удовлетворяются интересы нескольких отраслей водного хозяйства: водоснабжения, орошения, обводнения, гидроэнергетики, водного транспорта и др.

Состав отдельных комплексов определяется теми требованиями, которые в данных конкретных условиях предъявляют к водному хозяйству обслуживаемые им отрасли народного хозяйства. Обычно элементами комплекса являются: водоснабжение, гидроэнергетика, водный транспорт. В состав многих комплексов дополнительно входят: орошение, обводнение, осушение, борьба с наводнениями, рыбохозяйственные и другие мероприятия.

Различные отрасли водного хозяйства предъявляют и различные, иногда противоречивые требования к водным ресурсам.

Для гидроэнергетики вода является носителем энергии, которую вырабатывают гидроэлектростанции на создаваемом сооружении перепада (напоре). Вода, прошедшая через турбины верхней по течению реки гидроэлектростанции, может приводить в действие турбины ниже расположенной установки или использоваться водным транспортом, для водоснабжения, орошения и т. д.

Иной характер носит использование воды на орошение или обводнение, так как вода, идущая на поля, потребляется в значительной части безвозвратно. В этом отношении водоснабжение сходно с орошением и обводнением, но водоснабжение предъявляет повышенные требования к качеству воды.

Особое место занимает осушение, задачей которого является удаление избыточной влаги с заболоченных территорий. В результате осушения в известной мере увеличиваются ресурсы водного объекта, которые могут быть использованы другими отраслями.

В силу особенностей использования водных ресурсов одни

отрасли водного хозяйства являются водопользователями, другие — водопотребителями.

К водопользователям относятся отрасли, которые используют воду для своих нужд без прямого ее расходования, например водный транспорт, пользующийся водами рек, озер и водохранилищ как путями сообщения, или гидроэнергетика, использующая речной сток лишь для пропуска через турбины, или, наконец, рыбное хозяйство, использующее воду как среду. К водопотребителям относятся отрасли, которые расходуют воду для своих нужд лишь с частичным ее возвратом обратно в реку, например водоснабжение и орошение.

На рис. 1.1 представлены графики, схематически характеризующие режим водопользования и водопотребления различными отраслями водного хозяйства, в сопоставлении с режимом водотоков с весенним и летним половодьем. Из этих графиков следует, что режим потребления воды на орошение резко отличается от режима использования воды гидроэнергетикой (для орошения вода в основном необходима летом, а для гидроэнергетики зимой). Требования водного транспорта также противоположны требованиям гидроэнергетики и т. д. Особенно резко противоречия подобного рода возникают при устройстве гидроэлектрических станций в засушливых районах, водные ресурсы которых в основном используются на орошение.

Режим подачи воды на обводнительные мероприятия зависит от состава потребителей, входящих в обводнительный комплекс, а также от режима и ресурсов местных источников водоснабжения. На рис. 1.1 также показан ход поступления воды из осушительных систем в водоприемники.

Обращает внимание то обстоятельство, что естественный режим водотоков с летним половодьем хорошо согласуется с требованиями орошения, отчасти с требованиями водного транспорта, но не отвечает интересам других отраслей водного хозяйства. Режим стока рек с весенним половодьем не отвечает требованиям ни одной из отраслей водного хозяйства (особенно гидроэнергетики). Этим и объясняется, что при строительстве гидроэлектростанций создаются крупные водохранилища для регулирования стока, тогда как в других случаях потребность в крупных водохранилищах меньше.

При проектировании комплекса может выявиться, что суммарный спрос на воду превзойдет водные ресурсы. В этом случае приходится идти на некоторые ограничения одних отраслей водного хозяйства с тем, чтобы другие отрасли были удовлетворены полностью. Другое решение этого важного вопроса может заключаться в переброске стока из другого бассейна для увеличения ресурсов данного водного объекта или района.

В СССР комплексное использование получило широкое распространение. Одни и те же водохозяйственные установки

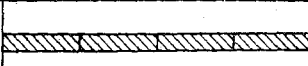
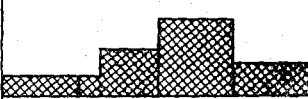
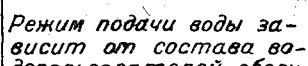
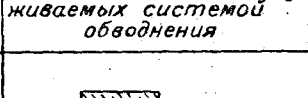
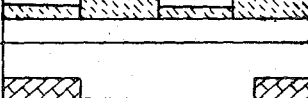


Отрасли водного хозяйства	Характер использования водных ресурсов	Режим водопользования			
		зима	весна	лето	осень
Водоснабжение	Часть воды потребляется безвозвратно				
Орошение	Часть воды потребляется безвозвратно				
Обводнение	Подача воды для всех отраслей водного хозяйства	Режим подачи воды зависит от состава водопользователей, обслуживаемых системой обводнения			
Осушение	Вода удаляется с заболоченных земель				
Гидроэнергетика	Используется только энергия воды				
Водный транспорт	Вода служит средой для плавания судов и лесосплава				
Режим стока реки с весенним половодьем					
Режим стока реки с летним половодьем					

Рис. 1.1. Особенности использования водных ресурсов отдельными отраслями водного хозяйства.

решают задачи водоснабжения, орошения и обводнения, улучшения водного транспорта, борьбы с наводнениями, выработки электрической энергии, увеличения продуктивности рыбного хозяйства и т. д. Уже построено и строится много водохозяйственных установок, комплексно использующих богатейшие водные ресурсы нашей страны. Установки на Днестре, Волге, Каме, Оби, Ангаре, Енисее и других реках имеют, как правило, энергетическое и воднотранспортное назначение, а некоторые из них (на Днестре, Волге) решают и другие народнохозяйственные задачи — орошение, обводнение и т. д. Широкий водохозяйственный комплекс решен постройкой Мингечаурской ГЭС на р. Куре, Цимлянкой ГЭС на Дону и др.

На наших реках обычно создаются каскады установок, что отражает наиболее передовой и научно-обоснованный подход к комплексному использованию водных ресурсов, поскольку одновременно с решением других народнохозяйственных задач полностью используются гидроэнергетические ресурсы реки и улучшается судоходство на всем ее протяжении.

#### **§ 4. ВРЕДНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА И ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

Качество природных вод в естественных условиях зависит от геологических и гидрогеологических особенностей бассейна, рельефа, растительного покрова, распашки почвы, количества и интенсивности выпадения атмосферных осадков и т. д.

Этими факторами определяется содержание в воде взвешенных наносов, а также стока растворенных солей и других химических соединений, характеризующих минерализацию воды.

В естественных озерах и искусственно созданных прудах и водохранилищах под влиянием испарения с водной поверхности минерализация воды повышается по сравнению с минерализацией воды рек, питающих эти водоемы.

В результате неупорядоченной хозяйственно-производственной деятельности человека, выражающейся, в частности, в сбросе в реки и водоемы неочищенных или частично очищенных бытовых и производственных сточных вод, качество природных вод ухудшается — повышается содержание в воде различных химических соединений, растворенных и нерастворенных органических веществ и пр. Загрязняется вода и засоряются реки и водоемы также продуктами лесосплава, нефтью и пр.

Неупорядоченная хозяйственно-производственная деятельность человека приводит к загрязнению не только воды, но и дна водоемов. Это загрязнение угнетающе действует на водное население, в первую очередь на рыбу, и снижает продуктивность рыбного хозяйства, технические и санитарные качества воды.

Особый вред при этом наносят сосредоточенные поступления загрязнений, обусловленные как нормальным характером работы некоторых предприятий, так и аварийными причинами. При сильном загрязнении вода становится непригодной не только для целей питьевого водоснабжения, но также для хозяйственных и промышленных нужд.

Очень медленно производится строительство очистных сооружений и многие предприятия продолжают сброс неочищенных сточных вод, что ускоряет процесс загрязнения рек и водоемов.

Чтобы представить, к каким нежелательным последствиям приводит неограниченный сброс промышленных сточных вод, приведем данные обследования Магнитогорского водохранилища. Оно было создано на р. Урале в 1931 г. (достроено в 1938 г.) для промышленного водоснабжения Магнитогорского металлургического комбината.

В водохранилище ежемесячно вносятся сотни и даже тысячи тонн различных загрязнений: серной кислоты, аммонийных солей, железа, хлористых солей, взвешенных веществ и т. п. Количество поступающих загрязнений, способных окисляться биохимическим путем, намного превышает самоочищающую<sup>1</sup> способность водохранилища, в результате чего за последние годы резко возросла степень загрязнения воды и появились затруднения в промышленном водоснабжении. Оказались сильно загрязненными и донные отложения. На дне водохранилища скопилось много продуктов от газификации кокса — смолы, фенолов, аммонийных соединений, а также нефтепродуктов — мазута, смазочных масел и других веществ. В результате возросшего загрязнения ухудшились условия для обитания донной фауны. Еще в 1942 г. донная фауна была многочисленна и разнообразна, а зимой 1956 г. она отсутствовала.

Степень перемешивания и разбавления попавших в водоемы сточных вод зависит от скорости течения в них. В этом отношении неблагоприятны малопроточные водоемы — озера и водохранилища, в которых замедляется удаление слабо разбавленных сточных вод от места выпуска, а эпизодические ветровые течения нагоняют их в любую сторону. У берегов поэтому создается сильно загрязненная зона, ухудшающая условия водопользования прибрежного населения.

Ввиду прогрессивного возрастания загрязнения рек и водоемов под влиянием сбросов в них сточных вод бурно развивающейся промышленностью (угледобычи, металлургической, химической, керамической и т. д.) вопросы их охраны вышли за рамки чисто санитарных интересов и превратились в серьезную

<sup>1</sup> В водной массе и донных отложениях водоемов всегда протекают химические и биохимические процессы, в результате которых органические вещества и некоторые минеральные примеси, поступающие с производственными сточными водами, теряют свои вредные свойства.



общегосударственную проблему, в разрешении которой заинтересованы все отрасли народного хозяйства. Необходимы срочные меры по очистке сбрасываемых сточных вод в целях сохранения рыбных богатств в реках, озерах и водохранилищах и возможности дальнейшего использования воды для хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения, культурных, санитарно-оздоровительных и других мероприятий.

В связи с быстрыми темпами индустриального развития страны и резкого увеличения общего потребления воды одновременно с проблемой борьбы с загрязнением возник вопрос упорядочения использования водных ресурсов. Уже сейчас в стране имеются районы, рост и промышленное развитие которых зависит от наличия водных ресурсов.

В 1960 г. Правительство Советского Союза всесторонне рассмотрело вопросы состояния использования и охраны водных ресурсов СССР и отметило, что в ряде районов страны имеет место нерациональное использование водных ресурсов, их истощение и загрязнение, чем наносится большой ущерб народному хозяйству. Отдельные совнархозы используют водные ресурсы без учета потребности в воде других совнархозов, а также без учета перспективы развития хозяйства экономических административных районов. Сброс неочищенных бытовых производственных сточных вод привел к чрезмерному загрязнению многих рек. Особенно сильно загрязнены реки Волга, Кама, Белая, Урал, Сев. Донец, Чусовая, Москва-река и др. Тяжелый ущерб нанесен рыбному хозяйству. Имели место случаи массовой гибели рыбы на Волге, Каме, Урале и на Москве-реке. Сброс неочищенных сточных вод приводит к ликвидации мест нереста, нагула промысловых рыб и их кормовых баз.

Совет Министров СССР постановлением от 22 апреля 1960 г. «О мерах по упорядочению использования и усилению охраны водных ресурсов СССР» утвердил план мероприятий на ряд лет, цель которых — добиться коренного улучшения использования и охраны водных ресурсов в интересах населения и народного хозяйства. Этим планом предусматривается создание специальных органов советов министров союзных республик по использованию и охране поверхностных и подземных водных ресурсов с инспекциями по бассейнам основных рек на территории республик.

На органы советов министров союзных республик по использованию и охране водных ресурсов, в частности, возложено следующее:

- а) плановый учет по количественным и качественным показателям поверхностных и подземных водных ресурсов на территории республики и обеспечение планового их использования;
- б) организация разработки водохозяйственных балансов и перспективных схем использования и охраны водных ресурсов

для бассейнов отдельных рек, промышленных районов и республики в целом;

в) контроль за мероприятиями по борьбе с вредным воздействием вод: наводнениями, подтоплениями, заболачиванием, эрозией почв, образованием оврагов и др.;

г) государственный надзор за учетом и рациональным использованием предприятиями водных ресурсов, а также за проведением этими предприятиями мероприятий по охране водоемов от загрязнения, засорения и истощения.

Надзор за надлежащим состоянием рек и водоемов и разработка мероприятий по их охране должны производиться органами советов министров союзных республик по использованию и охране водных ресурсов с участием санитарного, судоходного и рыбного надзоров, коммунальных и сельскохозяйственных органов.

Указанным постановлением Совета Министров предусматривается также создание в Госплане СССР Отдела водных ресурсов, на который возложено регулирование и координация использования и охраны водных ресурсов в стране, регламентация основных положений ведения водного хозяйства и планирование развития водных ресурсов в увязке с планом развития народного хозяйства СССР, а также координация всех работ по водохозяйственным объектам, затрагивающим интересы смежных республик и пограничных государств.

Совет Министров СССР возложил на Министерство строительства электростанций разработку схем использования и охраны водных ресурсов как в целом по стране, так и по отдельным республикам и особо важным водным бассейнам, а также составление генеральной перспективной схемы комплексного использования водных ресурсов страны и мероприятий по охране их на ближайшие годы.

В целях усиления охраны природных богатств и рационального их использования Верховный Совет РСФСР 27 октября 1960 г. принял закон об охране природы. В этом законе большое место отводится вопросам охраны и использования водных ресурсов. В статье 4-й, в частности, говорится: «Поверхностные и подземные воды подлежат охране от истощения, загрязнения и засорения, а также регулированию режима как ресурсы водоснабжения населения и народного хозяйства, источники энергии, транспортные пути, места произрастания полезной водной растительности, места обитания рыбы и водных животных, охотничьи угодья, места отдыха и туризма, лечебные ресурсы, объекты, представляющие интерес для науки, просвещения и культуры». В этом законе также вменяется в обязанность всем организациям, деятельность которых влияет на режим водных объектов, проведение ряда конкретных мероприятий, направленных на реализацию закона об охране природы.

## § 5. ЗАДАЧИ ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Водным хозяйством называют большую группу отраслей народного хозяйства, осуществляющих изучение, учет, охрану, регулирование, распределение и использование водных ресурсов в интересах населения и народного хозяйства, а также в целях защиты населения и материальных ценностей от разрушительного воздействия вод.

Некоторые задачи водного хозяйства — изучение, учет и охрана водных ресурсов рассмотрены в предыдущих параграфах настоящей главы. Ниже излагается содержание других задач водного хозяйства.

Для хозяйственно-питьевого водоснабжения в первую очередь используются подземные воды, так как их качество выше качества поверхностных вод. Во многих случаях подземных вод не хватает для полного покрытия потребности, вследствие чего приходится прибегать к использованию и поверхностных вод. Для водоснабжения же промышленных и транспортных предприятий, сельскохозяйственного орошения и других нужд народного хозяйства используются преимущественно поверхностные воды.

При организации водоснабжения, особенно хозяйственно-питьевого, в водоемах организуются зоны санитарной охраны. Подаваемая для питья вода подвергается тщательной очистке, а для производственных нужд — специальной обработке.

В ряде районов страны с небогатыми водными ресурсами — Центральный Казахстан, Донбасс, Ставропольский край и др. — по мере развития народного хозяйства условия использования водных ресурсов претерпели значительные изменения: для первоначального развития промышленности и сельского хозяйства было достаточно подземных вод и местных поверхностных вод — рек и озер. Теперь же местных водных ресурсов стало совершенно недостаточно и выявилась необходимость переброски воды из соседних бассейнов: из Иртыша для Центрального Казахстана, из Сев. Донца для Донбасса, из Кубани для Ставропольского края. В будущем появится необходимость осуществить переброски стока в более широких масштабах из бассейнов избыточного увлажнения — с Севера и Сибири — в бассейны недостаточного увлажнения — в области внутреннего стока Аральского и Каспийского морей.

Переброски стока из одного бассейна в другой возможны также и по соображениям более эффективного энергетического использования его на каскаде гидроэлектростанций противоположного склона, если используемое падение на нем больше. Показательна в этом смысле намечаемая переброска стока северных рек — Печоры, Вычегды и др. в реки бассейна Каспийского моря — Каму и Волгу. Помимо энергетического эффекта, пере-

броска стока северных рек окажет существенное влияние на улучшение водного баланса Каспийского моря.

Нередко одна речная система соединяется с другой с целью создания межбассейновых воднотранспортных путей, например Волго-Балтийский канал, канал имени Москвы, Волго-Донской и др.

На многих реках большие паводки вызывают значительные наводнения, приносящие огромный ущерб населению и народному хозяйству (главным образом сельскому хозяйству, использующему пойменные земли). Особенно значительны наводнения и обусловленный ими ущерб в областях с муссонным климатом (Дальний Восток), где паводки на реках формируются под влиянием интенсивных и затяжных летних дождей. Большие наводнения наблюдаются и на реках со снеговым половодьем, особенно если интенсивное снеготаяние сопровождается выпадением сильных дождей.

В 1928 г. р. Зея (приток Амура) после многодневных дождей вышла из берегов и затопила г. Зея. Пострадали также города, расположенные на Амуре, — Благовещенск и Хабаровск. Наводнение продолжалось почти два месяца. Сильные наводнения на р. Зее наблюдались также в 1923, 1938, 1953 и 1956 гг. [6]. Очень часты наводнения и на верхнем Амуре, обусловленные большими паводками, формирующимися в бассейнах Шилки и Аргуни, от слияния которых образуется Амур. Еще чаще наблюдаются наводнения на среднем Амуре, которые обуславливаются как паводками с верхнего Амура, так и паводками с его притоков — Зеи с Селемджей и Буреи. Страдает от частых и сильных наводнений население и народное хозяйство в долинах рек Приморья — Улахэ, Уссури и др.

Большие наводнения отмечались и на многих других реках СССР: Волге и Оке в 1908 г., Куре, Терек, Кубани, Днестре, Днепре, Дону, Сыр-Дарье, Иртыше, Енисее и др.

В долинах рек от катастрофических наводнений страдает население и хозяйство зарубежных стран (США, Италии, Англии, Индии, Пакистана, Бирмы и др.). В недавнем прошлом катастрофические наводнения имели место в долинах рек Китая: Хуанхэ, Хуайхэ, Янцзы и др. За последние 2162 года (с 206 г. до н. э. до 1956 г.) в Китае было 1031 сильное наводнение. В 1931 г. на Янцзы была затоплена площадь в 100 тыс. км<sup>2</sup> и пострадало 28 млн. человек. В 1954 г. на Янцзы наводнение было гораздо сильнее наводнения 1931 г., но благодаря принятым мерам площадь затопления не превысила 1/3 площади затоплений 1931 г. На р. Хуанхэ на протяжении трех с лишним тысяч лет произошло более 1500 прорывов дамб, которыми обваловано нижнее течение реки, что приводило к разрушительным наводнениям с человеческими жертвами и огромными материальными потерями.

Тысячелетиями борьба с наводнениями велась путем ограждения затопляемых территорий. В Египте (с 3400 г. до н. э.), Китае, Индии, Пакистане, Бирме, Вьетнаме и других странах выполнены огромные работы по постройке ограждающих дамб. В странах Европы обвалование начало распространяться с начала использования (XII век) для сельскохозяйственного производства пойменных земель Дуная, Рейна, Тиссы, Вислы и др.

В СССР обвалование применялось в долинах рек Куры, Терека, Кубани, Сыр-Дарьи, Аму-Дарьи и др.

Ввиду высокой стоимости строительства и эксплуатации дамб обвалования, а также недостаточной их надежности как средства защиты от наводнений в последнее время во многих случаях признается более прогрессивным осуществлять борьбу с наводнениями путем регулирования паводков водохранилищами.

При комплексном использовании водных ресурсов задача борьбы с наводнениями путем регулирования паводков решается теми же водохранилищами, которые создаются для регулирования низкого стока водотоков с целью приспособления его к нуждам различных отраслей народного хозяйства. Подобное совмещение регулирующих функций в одном водохранилище осуществлено в Мингечаурском хранилище на Куре, водохранилище Саньмынься на Хуанхэ (КНР) и др. Предполагается осуществить совмещение таких функций в запроектированных водохранилищах на Зее, Амуре, Бурее, Улахэ и др.

Использование водных ресурсов с применением регулирующих водохранилищ является наиболее совершенным. Водохранилища позволяют полнее и при том с наибольшим эффектом для народного хозяйства реализовать водные ресурсы.

Выполняя основную задачу — регулирование низкого стока и паводков, водохранилища улучшают условия водного транспорта в пределах влияния подпора, способствуют рыбозаведению и рыбодобыче, а в некоторых случаях улучшению санитарных условий путем затопления болот, благоустройству населенных мест и т. п.

Большие глубины водохранилищ позволяют организовать судоходство и лесосплав в крупных с большой осадкой единицах, укорачивать трассы; строительство новых портов и пристаней способствует экономическому и культурному подъему близлежащих районов.

Водохранилища создают командование над землями речной долины, обеспечивая самотечную подачу воды на орошение и обводнение.

Большие водные пространства крупных водохранилищ вызывают некоторые изменения микроклимата, растительности, режима грунтовых вод в прибрежных районах.

Кроме большой пользы, водохранилища приносят и вред, так как приводят к неизбежным затоплениям и подтоплениям территорий и к другим серьезным нарушениям в народном хозяйстве. Затопляются десятки, а иногда и сотни тысяч гектаров удобных в сельскохозяйственном отношении земель, пашен и заливных лугов; затопляются значительные лесные угодья, населенные пункты, промышленные, транспортные и другие сооружения. Наряду с нарушениями от постоянных затоплений возникают временные затопления и подтопления и вызываемые ими заболачивание земель, деформации русел и обрушения берегов.

В общем улучшая условия судоходства, водохранилища в то же время создают и известные трудности для него, так как требуется замена речных судов на суда озерного типа. С образованием водохранилищ создаются затруднения и для лесосплава, поскольку молевой сплав заменяется более дорогим сплавом леса в кошелях и плотках с буксирной тягой и т. д. В водохранилищах иногда происходит всплывание торфяников большими площадями (так называемых «лижм»), затрудняющих работу гидроэлектростанций и гидротехнических сооружений.

Затраты на ликвидацию нарушений в народном хозяйстве от затоплений, подтоплений и пр. ложатся тяжелым бременем на общие затраты по водохозяйственному комплексу и нередко ограничивают высоту подпора (см. гл. 12).

В задачи водного хозяйства входит решение и многих других вопросов.

Приведенные данные и соображения показывают, что задачи водного хозяйства весьма обширны. Их можно свести к следующему: изучение, учет и охрана водных ресурсов от истощения и загрязнения, регулирование низкого стока с целью приведения его в соответствие с нуждами населения и требованиями различных отраслей народного хозяйства; борьба с наводнениями путем регулирования паводков и проведения защитных мероприятий; борьба с вредными и разрушительными действиями вод; осуществление водноземельных мелиораций с целью обеспечения оптимальной влажности почв путем устройства оросительных и осушительных систем; использование водной энергии рек в гидроэлектрических станциях; приведение рек в судоходное и лесосплавное состояние посредством регулирования стока, дноуглубления, выправления и шлюзования; создания искусственных водных путей (каналов), соединяющих бассейны соседних рек; обеспечение надлежащих условий для эффективной организации рыбоводства в реках, озерах и водохранилищах, использование местного стока малых рек для орошения и обводнения путем устройства прудов и мелких водохранилищ; переброска стока из одного бассейна в другой для улучшения водного баланса или энергетического использования и др.

## § 6. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

### Дореволюционный период

Начало использования подземных и поверхностных вод в СССР для водоснабжения и орошения уходит в глубокую древность. В Араратской долине и в ряде других мест Армении, например, орошение возникло одновременно с земледелием. Судя по памятникам материальной культуры, создание оросительных систем в Армении относится к VIII в. до н. э., когда были построены каналы Старо-Далминский, Старо-Сардарабадский и др., часть которых эксплуатируется и в наше время. Остатки древних оросительных сооружений, относящихся к IV в. до н. э., сохранились до наших дней и в Грузии. Остатки существовавших два с лишним тысячелетия назад оросительных систем также обнаружены на территории современной Кара-Калпакии, в Ферганской долине р. Сыр-Дарьи и в долинах рек Зеравшан и Сурхан-Дарьи в Узбекской ССР.

В последующее время ирригационное строительство стало развиваться более интенсивно. Так, в Закавказье в XII и XIII вв. построены Алазанский и Самгорский каналы, а позже проводились оросительные работы в Мильской и Муганской степях. Крупные по тому времени оросительные работы проводились в Средней Азии — в Голодной степи, долине р. Мургаб и др.

Осушительные работы проводились в Белоруссии и Барабинских степях.

В предвидении дальнейшего роста оросительных и осушительных работ были проведены исследования земельных массивов на юге России и Северном Кавказе, в Поволжье, Белоруссии, Закавказье и Средней Азии экспедициями И. И. Жилинского, В. В. Докучаева и многими партиями Отдела земельных улучшений Министерства земледелия. Составлялись также проекты мелиоративных работ. Этим проектам в царской России, однако, не суждено было осуществиться.

В далеком прошлом многочисленные реки, образующие широко разветвленную речную сеть, служили наиболее дешевыми и во многих местах единственными путями для перевозки массовых грузов. Уже во время Киевской Руси (IX—X вв.) существовал великий торговый путь «из варяг в греки», соединявший Балтийское море с Черным и проходивший по следующим рекам и озерам: Нева — Ладожское озеро — Волхов — оз. Ильмень — Ловать — Западная Двина — Днепр. Имеются предположения, что тогда же существовали и другие направления водного пути из Черного моря в Балтийское, например, по рекам: Днепр, Березина, Западная Двина.

При Петре I было осуществлено соединение р. Оки с верховьями р. Дона Ивановским каналом, полуразрушенные

шлюзы которого частично сохранились до наших дней. В 1703 г. была начата и в 1719 г. закончена постройка Вышневолоцкой водной системы, которая соединяет Волгу с Балтийским морем через Тверцу — Цну — Мсту — оз. Ильмен — Волхов — Ладожское озеро — Неву. В ту же эпоху были построены Приладожские каналы (1732 г.) и другие сооружения. Из сподвижников Петра I надо отметить крупнейшего гидротехника М. И. Сердюкова — строителя Вышневолоцкой системы и многих больших плотин.

В XIX в. вступает в строй ряд межбассейновых воднотранспортных соединений. Первое из них — Мариинский водный путь (1810 г.). Он соединяет Волгу с Балтийским морем через Шексну — Белое озеро — Ковжу — Вытегру — Онежское озеро — Свирь — Неву. Почти одновременно (1811 г.) открывается движение по другому Волго-Балтийскому соединению — Тихвинской водной системе, через Мологу — Чагодошу — Тихвинку — Сясь — Ладожское озеро — Неву. В 1822 г. закончилась постройка Северо-Екатерининского канала, соединившего Каму с Вычегдой (через южную и северную Кельтму). Этот канал просуществовал недолго.

Воднотранспортные соединения создавались с помощью целого ряда инженерных сооружений, таких, как плотины, водораздельные водохранилища, шлюзы, соединительные и обходные каналы (в обход Ладожского, Онежского и Белого озер) и т. п.

В конце XIX и в начале XX в. выполнены значительные работы по шлюзованию рек Оки, Северного Донца, Дона, Шексны.

В дореволюционный период в области водных путей проведены значительные исследования и составлены описания крупных рек: Волги, Дона, Днепра, Оби, Енисея, Лены и др.; здесь необходимо назвать имена таких исследователей, как Н. А. Богуславский, В. М. Родевич, Е. В. Близняк и др. Крупные реки поддерживались в судоходном состоянии при помощи выправительных и землечерпательных работ, методы которых разработаны видными гидротехниками: Н. С. Лелявским, В. М. Лохтиным, В. Е. Тимоновым и др.

К давним временам относится и начало использования водной энергии. В этой области первыми сооружениями являлись запруды для мукомольных поставов. О водяных мельницах упоминается в русских летописях IX—XIII вв., в XV—XVI и в особенности в XVII в. мельницы строились повсюду и часто во вред другим отраслям хозяйства: судоходству, дорогам и т. д.

В XVIII в. для горно-рудного дела, металлургической и другой промышленности строилось много водосилового установок. Для этой цели было построено более 200 больших заводских плотин на Урале, Алтае, в Карелии, Забайкалье, в центральных частях России.



Для устранения перерывов в работе установок в периоды маловодья осуществлялись мероприятия по регулированию стока.

На Урале создавались отдельные водохранилища и даже системы водохранилищ, из которых многие сохранились и до настоящего времени (Исетское озеро). В связи с осуществлением мероприятий по инженерной ирригации создавались водохранилища и в Средней Азии, в частности на р. Мургаб.

В начале XVIII в. построено первое крупное так называемое Заводское водохранилище для регулирования стока Цны и Шлины с целью подачи воды на судоходство в мелководные Тверцу (Волжский склон) и Цну (Балтийский склон). Заводское водохранилище имело площадь зеркала  $70 \text{ км}^2$  и полезный объем  $170 \text{ млн. м}^3$ . В реконструированном виде оно существует и теперь.

К числу крупных гидротехнических мероприятий XIX в. следует отнести и достройку в 1843 г. Верхневолжского бейшлота, благодаря которому путем попусков удавалось поддерживать необходимые глубины на Верхней Волге до Твери (плотинной с напором  $7 \text{ м}$  создано водохранилище емкостью  $400 \text{ млн. м}^3$ ).

Русскими «плотинными мастерами» разработаны оригинальные конструкции плотин, приспособленные к природным условиям русских рек.

Из русских гидротехников того времени следует отметить А. Ярцева, Е. А. и М. Е. Черепановых, И. И. Ползунова и особенно К. Д. Фролова, а также М. В. Ломоносова, который среди своих многообразных трудов занимался и гидротехникой, построив плотину на Усть-Рудицком заводе, и проводил опыты на мельницах.

### **После Великой Октябрьской социалистической революции**

Несмотря на отмеченные достижения, использование водных ресурсов в дореволюционной России находилось на низком уровне и преследовало узко отраслевые цели, что объяснялось общим застоем промышленности, транспорта и сельского хозяйства. Право частной собственности на землю являлось наибольшим тормозом, так как интересы землевладельцев не допускали затопления земель при устройстве подпорных сооружений. Энергетическое же использование водных ресурсов в прошлом тормозилось еще и отсутствием способов передачи энергии на большие расстояния, что делало обязательным размещение промышленных предприятий непосредственно у силовой установки, часто в отрыве от сырьевой базы.

Разработанная Коммунистической партией величественная программа развития всех отраслей народного хозяйства Советского Союза, основой которого является тяжелая индустрия,

предопределила перевод экономики страны на новый более высокий технический уровень. Огромная роль в этой программе отводится освоению богатейших природных ресурсов, и в частности водных и водноэнергетических. Не случайно поэтому, что сразу же после Великой Октябрьской социалистической революции произошел резкий перелом в ходе использования водных ресурсов нашей страны.

Еще на заре Советской власти, в 1918 г., правительство, возглавляемое В. И. Лениным, издало декрет об организации работ по орошению 500 тыс. десятин земли в хлопковых районах Средней Азии, а в апреле того же года был создан Комитет государственных сооружений, разработавший план мелиоративных работ в Европейской России. Придавая большое значение хозяйственному и культурному развитию народов Средней Азии, В. И. Ленин писал: «Орошение особенно важно, чтобы поднять земледелие и скотоводство во что бы то ни стало»<sup>1</sup>.

Гражданская война и интервенция, однако, не позволили тогда же приступить к реализации Ленинского плана широкого развития водных мелиораций.

Гражданская война и интервенция нанесли имевшимся тогда оросительным и осушительным системам большие разрушения. Площади орошаемых земель резко сократились — с 4,0 млн. га в 1913 г. до 2,2 млн. га в 1921—1923 гг., а урожайность снизилась. Валовой сбор хлопка — волокна, например, сократился с 18,4 млн. пудов в 1915 г. до 0,6 млн. пудов в 1922 г.

Осушительные системы в западных и северо-западных областях Европейской России также пришли в упадок, большие площади ранее осушенных земель снова заболотились. В современных границах РСФСР, Украинской и Белорусской ССР площадь осушения сократилась с 1,5 млн. га в 1913 г. до 0,7 млн. га в 1921—1922 гг.

Рассматривая водные мелиорации как одну из основ социалистической реконструкции сельского хозяйства, партия и правительство подняли широкие массы трудового крестьянства на большие мелиоративные работы и уже в 1928 г. площадь орошаемых земель достигла уровня 1913 г., составив 4,1 млн. га. Посевная площадь под хлопчатником увеличилась до 1,0 млн. га против 0,7 млн. га в 1913 г. Площадь осушенных земель в 1928 г. была доведена до 1,3 млн. га.

В результате проведенных крупных работ по орошению в Узбекистане (Голодная степь и Центральная Фергана), Туркмении, Таджикистане, Казахстане, Грузии, Молдавии, засушливых районах Заволжья, бассейнах рек Терека, Кубани и Кумы, в Крыму и на Украине площадь орошения в 1937 г. составила

---

<sup>1</sup> В. И. Ленин. Собрание сочинений. Изд. 4-е, т. 32, стр. 297.

5,9 млн. га. Площадь осушенных земель в 1937 г. возросла до 2,3 млн. га.

В связи с решением XVIII съезда КПСС осуществляются крупные работы по осушению земель Полесья, Барабинской низменности и др.

В 1939 г. началось замечательное патриотическое движение за проведение строительства оросительных систем силами колхозников. За 45 дней был построен Большой Ферганский канал длиной 275 км с пропускной способностью в головной части 100 м<sup>3</sup>/сек, позволивший обводнить 500 тыс. га хлопковых поливных земель и дополнительно оросить 63 тыс. га. В 1940 г. за 30 дней в Казахской ССР был построен Большой Чуйский канал протяженностью 150 км и пропускной способностью 38 м<sup>3</sup>/сек.

В 1940 г. в Воронежской и других областях началось массовое строительство прудов. За один год в стране было построено свыше 1700 новых прудов и отремонтировано более 20 тыс. старых.

За 2—3 года в республиках Средней Азии была создана широкая сеть новых оросительных каналов и крупных гидротехнических сооружений. Только в Узбекистане за 1939 г. было построено 52 ирригационных объекта. Были начаты работы по строительству крупных ирригационных сооружений — Ортокойского водохранилища на р. Чу в Киргизской ССР, Кызыл-Ординской плотины на р. Сыр-Дарье в Казахской ССР, Катта-Курганского водохранилища для регулирования стока р. Зеравшана и Урта-Токайского водохранилища для регулирования стока р. Кассан-Сай в Узбекской ССР. Вступила в эксплуатацию Алханчауртская и Терско-Кумская оросительно-обводнительные системы на Северном Кавказе, Алейская и Кутулукская системы в РСФСР и много других.

В итоге к концу 1940 г. площадь орошаемых земель достигла 6,3 млн. га. Площадь осушенных земель к концу 1940 г. возросла до 6,0 млн. га, а с учетом вошедших в СССР Литовской, Латвийской и Эстонской ССР — до 9,2 млн. га.

Великая Отечественная война нанесла серьезный урон водохозяйственному строительству. Несколько сократились площади орошаемых (на 0,4 млн. га) и осушаемых земель (на 0,2 млн. га).

В послевоенные годы в соответствии с решениями Пленумов ЦК и XIX, XX и XXI съездов КПСС широким фронтом развернулось ирригационное строительство, реконструкция и техническое усовершенствование действующих систем в Средней Азии, Закавказье, в центрально-черноземных областях, Поволжье, на Северном Кавказе, Украине, в Крыму, Западной Сибири и Казахстане. Большие работы развернулись и по осушению.

В 1949—1950 гг. началось строительство 215 крупных водохозяйственных объектов ирригационного назначения, а также

оросительных систем на базе Волго-Донского канала и Цимлянского водохранилища, Невинномысского и Право-Егорлыкского каналов в бассейне р. Кубани и оросительных систем для развития рисосеяния на Кубани, Прасковейской и Мало-Кабардинской в бассейне р. Терека. Тогда же развернулись работы по орошению Кура-Араксинской низменности в Азербайджане, строительству Старо-Крымского водохранилища и артезианских скважин в Крымской области.

В республиках Средней Азии и Закавказья развернулись работы по регулированию водного режима рек путем постройки и достройки ряда водохранилищ — Катта-Курганского, Урта-Токайского и Кую-Мазарского в Узбекистане, Гедженского в Туркмении и др., строительства новых оросительных систем и т. д.

В контрольных цифрах развития народного хозяйства СССР на семилетие 1959—1965 гг., утвержденных XXI съездом КПСС, предусматривается увеличение орошаемых площадей в хлопкосеющих районах на 1 млн. га с тем, чтобы сбор хлопка-сырца в 1965 г. довести до 5,7—6,1 млн. т, что в 1,5 раза больше, чем было собрано в 1958 г.

В основном эта проблема будет решена за счет освоения и орошения плодородных целинных земель Голодной степи, что позволит превратить ее в крупнейшую хлопковую базу Советского Союза, производящую ежегодно около 1 млн. т хлопка-сырца. Из 600 тыс. га пригодной для орошения и сельскохозяйственного использования площади самотечной зоны Голодной степи 220 тыс. га уже орошается.

Вода для орошения земель Голодной степи будет подаваться двумя магистральными каналами: существующим Северным каналом имени Кирова и строящимся Южным каналом в Голодной степи. Вода в каналы поступает из верхнего бьефа Фархадской плотины на р. Сыр-Дарье по деривационному каналу Фархадской ГЭС. Большое значение для освоения Голодной степи имеет водохранилище Кайрак-Кумской ГЭС (закончено строительство в 1957 г.), расположенное выше Фархадской плотины, емкость которого обеспечивает необходимое регулирование стока.

Работы по обводнению пастбищ развертываются в Казахской, Туркменской, Узбекской, Таджикской, Азербайджанской, Армянской, Грузинской, Киргизской, Украинской ССР и РСФСР на суммарной площади почти в 72 млн. га.

Осушительные работы проводятся в основном в Прибалтийских республиках и в Белорусской ССР.

В Белоруссии имеется более 7 млн. га болот и заболоченных земель и до 1 млн. га старопашотных минеральных земель, посеы на которых периодически страдают от вымочек, а в отдельные влажные годы полностью гибнут. Более половины лугов и пастбищ заболочены. Продуктивность болотных и заболоченных

лугов низкая. Сбор низкокачественного сена с этих угодий не превышает 10 ц с гектара.

До революции в Белоруссии были проложены осушительные каналы на площади 500 тыс. десятин. Освоено несколько сотен десятин заболоченных минеральных земель. К 40-й годовщине Советской власти дополнительно осушено около 500 тыс. га болот и заболоченных земель, которые используются для сельскохозяйственного производства. На осушенных массивах урожайность сельскохозяйственных культур резко повышается: сеяных многолетних трав до 112 ц/га, зерновых культур более 30 ц/га, картофеля до 350 ц/га.

В результате осушения и освоения Полесской низменности посевная площадь в колхозах и совхозах Белорусской ССР увеличилась в два с лишним раза.

На территории СССР к 1957 г. площадь земель с оросительной сетью достигла 11,1 млн. га, а с осушительной сетью — 8,4 млн. га. Фактически в 1957 г. орошалось 7,2 млн. га, т. е. 65%. С учетом лиманного орошения площадь поливных земель составила 8,3 млн. га. Таким образом, общая площадь мелиорированных земель (поливных и осушенных) по СССР в 1957 г. достигла 16,7 млн. га [4].

Неполное использование земельного фонда с оросительной сетью объясняется рядом причин — недостатком воды, неисправностью оросительных систем и т. п.

По площади земель с оросительной сетью СССР в настоящее время занимает третье место в мире после Китайской Народной Республики и Индии. В Узбекской, Таджикской, Туркменской, Киргизской, Азербайджанской, Армянской ССР и южных областях Казахской ССР свыше 90% валовой продукции растениеводства выращивается на орошаемых землях.

Интересны данные об орошаемых и осушаемых землях на земном шаре.

Около двух третей суши земного шара находится в условиях постоянного или временного недостатка влаги. Значительная часть этой территории относится к зоне пустынь и полупустынь, где земледелие возможно только при искусственном орошении.

Остальная треть суши представляет территорию с достаточным увлажнением, на которой большая часть культур обеспечена необходимой влагой, а иногда даже страдает от ее избытка. Здесь расположены огромные площади болот и заболоченных земель, сельское хозяйство на которых возможно лишь при осушении.

По предварительной оценке в 1958 г., мировая площадь орошения составляла около 160 млн. га. Площадь осушенных земель на земном шаре равна примерно 50 млн. га.

По данным Международной комиссии по ирригации и дренажу Организации Объединенных Наций, опубликованным

в 1955 г., общая площадь орошаемых земель к началу второй половины XX в. составляла около 121 млн. га. Значительная часть этой площади (около 85%) распределяется между следующими 13 странами (с площадью орошения в каждой более 2 млн. га — табл. 7.1).

Таблица 7.11

Страна	Орошаемая площадь, млн. га	Процент орошаемой площади по отношению к обрабатываемой
Всего по земному шару . . . . .	121,00	13,0
в том числе:		
Китай . . . . .	31,20	23,0
Индия . . . . .	23,60	19,9
США . . . . .	10,49	7,7
Пакистан . . . . .	8,40	47,4
СССР . . . . .	6,43	—
Индонезия . . . . .	4,20	39,2
Япония . . . . .	3,82	75,6
Ирак . . . . .	3,26	—
Египет . . . . .	2,80	100,0
Франция . . . . .	2,50	7,9
Италия . . . . .	2,20	9,5
Мексика . . . . .	2,16	9,2
Иран . . . . .	2,00	—

<sup>1</sup> Н. Д. Гулати. Орошение в разных странах мира. Перевод с английского. Сельхозгиз, М., 1957.

Поливные земли в основном используются под рисосеяние. В Китае, например, под рисом занято до 80% всей поливной площади. Рисосеяние развито также в Корее, Японии, Индокитае, Таиланде, Бирме, Индонезии, Индии и других странах Юго-Восточной Азии. В Европе больше других стран рис культивируется в Италии. Наряду с рисом на орошаемых землях возделывается пшеница и другие зерновые, а также овощи и плоды.

Во многих странах на орошаемых землях большие площади заняты под хлопчатником. В Египетском районе ОАР, Судане, среднеазиатских республиках СССР под хлопчатник отводится нередко до 50% поливных земель. Значительные площади заняты им в Индии, Пакистане, Иране, Ираке, Бирме, Китае, Аргентине, США и др. Из остальных технических культур на поливных землях возделывают сахарную свеклу, сахарный тростник, табак, арахис и другие масличные культуры, а также прядильные культуры — джут, кенаф и др.

В некоторых странах, например в США и Канаде, до 50% поливных площадей отводится под кормовые культуры. Однако основную роль в производстве кормов играют осушенные земли, сосредоточенные по преимуществу в районах развитого животноводства.

В странах, расположенных вдоль побережья Балтийского моря, — ГДР и ФРГ, Дании, Польской Народной Республики, Прибалтийских республиках и др. 50—70% и более всех сельскохозяйственных угодий составляют осушенные земли, используемые в основном под кормовые культуры, затем под зерновые и овощи, технические культуры — коноплю, сахарную свеклу.

В США крупнейшим районом осушения являются восточные штаты, где осушенные земли по преимуществу используются для производства кормов. В южных штатах США осушенные земли в основном отводятся под производство плодов и овощей.

За годы Советской власти получила широкое развитие и проблема водоснабжения городов и промышленных центров.

В дореволюционной России водоснабжение многих районов было поставлено очень плохо. Антисанитарные условия, водный голод и жилища в виде землянок и казарм были типичны для промышленных поселков и городов. Владельцы заводов и шахт, организуя примитивное водоснабжение, стремились в первую очередь обеспечить водой предприятия. Источники водоснабжения были загрязнены, свирепствовали инфекционные заболевания. Нормы душевого потребления даже такой недоброкачественной воды были низкими — 15—20 л и меньше.

В частности, начиная с первой пятилетки, в связи с ростом промышленности и городов Донбасса, водные ресурсы которого крайне незначительны, вопрос водоснабжения приобрел особую остроту и вырос в одну из важнейших хозяйственно-политических проблем. Если в 1931 г. Донбасс потреблял 60 млн. м<sup>3</sup> воды в год, то в 1950 г. им было израсходовано уже 340 млн. м<sup>3</sup> воды. При этом удовлетворялись лишь самые минимальные потребности.

Строительство в последние годы ряда водохранилищ для регулирования местного стока и сооружение водопровода с забором воды из р. Сев. Донца хотя и улучшили, но полностью не решили проблему водоснабжения Донбасса. Коренное улучшение водоснабжения Донбасса могло быть осуществлено только путем забора из р. Сев. Донца больших объемов воды, для чего потребовалось построить канал с подачей воды в центральные районы Донецкого бассейна. Параллельно улучшено санитарное состояние городов и промышленных центров. Пропускная способность канала доведена до 25 м<sup>3</sup>/сек в летнее время и 18 м<sup>3</sup>/сек зимой. Ежегодно по каналу будет подаваться в Донбасс 600 млн. м<sup>3</sup> воды.

Крупные работы по водоснабжению проведены и во многих других городах и промышленных центрах — Москве, Баку, Челябинске, Свердловске и др. Москва снабжается водой в основном из р. Волги через канал имени Москвы.

Одновременно с организацией работ по водным мелиорациям и водоснабжению Советское правительство во главе с В. И. Лениным наметило пути освоения гидроэнергетических ресурсов.

Уже в 1918 г. было начато строительство Волховской гидроэлектростанции и поставлены на реальную почву проблемы использования Днепровских порогов, рек Кавказа и др. В 1920 г. вышел в свет исторический документ о создании Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО). ГОЭЛРО разработала план электрификации, названный Лениным второй программой партии. План предусматривал в течение 15 лет ввод 1750 тыс. *квт* новых мощностей (при общей мощности всех электростанций России в 1913 г. 1100 тыс. *квт*), в том числе 640 тыс. *квт* на гидроэлектростанциях. Через 8 лет после утверждения план ГОЭЛРО был перевыполнен.

Первая крупная гидроэлектростанция — Волховская — вступила в строй в 1926 г. Ее мощность 66 тыс. *квт*. Затем вступают Ереванская и Бозсуйская (1926 г.), Земо-Авчалская и Хариузовская (1927 г.).

Небывалый размах гидроэнергостроительство получило в годы довоенных пятилеток, в особенности после победоносного окончания Великой Отечественной войны.

В течение пяти первых пятилеток были построены следующие гидроэлектрические станции.

В первую пятилетку (1928—1932 гг.) построены Кондопожская ГЭС, Первомайская ГЭС и ДнепрогЭС им. В. И. Ленина (первая машина введена в 1932 г.), во вторую пятилетку (1933—1937 гг.) — Нижне-Свирская, Рионская, Ивановская, Нижне-Тулумская, Гизельдонская, Ульбинская и другие ГЭС, дооборудована Днепровская.

Всего за два первых пятилетия введено в эксплуатацию 32 крупных и средних ГЭС.

В третью пятилетку (1938—1942 гг.) сданы в эксплуатацию Рыбинская, Угличская, Тавакская, Комсомольская, Кегумская и ряд ГЭС на Кавказе.

К началу Великой Отечественной войны завершено строительство 40 крупных и средних ГЭС. Удельный вес ГЭС в общей выработке энергии страны в 1940 г. составил 10,5%.

В четвертую пятилетку (1946—1950 гг.) осуществлено восстановление всех разрушенных и поврежденных немецко-фашистскими захватчиками гидроэлектростанций: Днепровской, Нижне-Свирской, Кегумской, Кондопожской, Баксанской и др. и ввод на полную мощность новых: Рыбинской, Нива III,



Фархадской, Храмской, Сухумской, Севанской, Краснополянской, Широковской и других ГЭС.

Мощность всех гидроэлектростанций в стране к концу 1950 г. достигла 3,2 млн. *квт*, а годовая выработка энергии — 12,7 млрд. *квт-ч* при общей выработке по всем электростанциям 91,2 млрд. *квт-ч*.

В пятую пятилетку (1951—1955 гг.) построены Усть-Каменогорская, Цимлянская, Гюмушская, Верхне-Свирская, Мингечаурская ГЭС. Начали работать Волжская ГЭС им. В. И. Ленина, Пермская, Каховская, Горьковская, Дубоссарская, Нарвская и другие ГЭС.

Всего за годы Советской власти к концу пятого пятилетия построено в различных районах страны 90 крупных и средних гидроэлектрических станций.

В 1955 г. мощность всех гидроэлектростанций СССР достигла почти 6 млн. *квт*, а годовая выработка энергии 23,2 млрд. *квт-ч* при общей выработке по всем электростанциям 170 млрд. *квт-ч*. Доля гидроэнергии в общей выработке энергии страны в 1955 г. составила 13,6%.

Большое развитие гидроэнергетики получила в 1956—1958 гг., когда только в одном 1956 г. были пущены на полную мощность Горьковская, Каховская, Князегубская, Раякоски, Ортачалская ГЭС и введены новые: Иркутская, Кайрак-Кумская, Ондская и другие ГЭС. На полную мощность введена Волжская ГЭС имени В. И. Ленина, оборудованная 20 агрегатами общей мощностью 2,3 млн. *квт*. В декабре 1958 г. введены первые агрегаты самой крупной гидроэлектростанции в мире — Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС.

В настоящее время наши гидроэнергетические ресурсы используются еще крайне незначительно (табл. 8.1). Мы только приступаем к использованию наиболее экономичных источников гидроэнергии в восточных районах страны, где в силу местных условий возможна наибольшая концентрация мощности. Что касается основных рек Европейской части СССР — Волги и Днепра, то их ресурсы в скором времени будут практически полностью использованы.

Степень использования гидроэнергетических ресурсов СССР значительно ниже, чем в капиталистических странах (табл. 9.1).

Величественную программу развития энергетики в нашей стране наметил XXI съезд КПСС. За семилетие (1959—1965 гг.) предусматривается построить и ввести в действие новые крупные электростанции общей мощностью 58—60 млн. *квт*, т. е. почти в 35 раз больше, чем по плану ГОЭЛРО. Это почти столько, сколько введено в эксплуатацию Англией, Францией и Западной Германией, вместе взятых, за все время существования этих стран. Чтобы представить грандиозность намеченного плана, необходимо вспомнить, что за все годы Советской власти (до

1958 г.) общая мощность электростанций выросла с 1 до 52 млн. квт. Таким образом, то что было сделано за 41 год, теперь предстоит осуществить за семь лет.

Огромный прирост мощностей может быть осуществлен лишь

Таблица 8.1

Район	Возможные к использованию ресурсы, млрд. квт-ч	Выработка энергии на ГЭС за 1956 г., млрд. квт-ч	Процент использования
Северо-Запад . . . . .	21	6,2	30
Север . . . . .	25	—	—
Центр, Поволжье и Урал . . . . .	77	6,4	8
Северный Кавказ . . . . .	40	2,1	5
Западная Сибирь . . . . .	130	—	—
Восточная Сибирь . . . . .	800	—	—
Дальний Восток . . . . .	250	—	—
Запад и Юг . . . . .	29	4,6	16
Закавказье . . . . .	64	5,0	8
Средняя Азия . . . . .	225	3,2	1,4
Казахстан . . . . .	60	1,5	2,5
Всего . . . . .	1721	29,0	1,7

Таблица 9.1

Страна	Возможные к использованию ресурсы, млрд. квт-ч	Выработка энергии на ГЭС в 1955 г., млрд. квт-ч	Процент использования
СССР <sup>1</sup> . . . . .	1721	23,2	1,4
США . . . . .	491	116,0	23,7
Канада . . . . .	325	77,0	24,2
Япония . . . . .	70	48,5	69,5
Италия . . . . .	55	30,8	56,0
Франция . . . . .	67,5	25,6	38,3
Норвегия . . . . .	128	23,4	18,3
Швеция . . . . .	80	21,6	27,0

<sup>1</sup> Использование гидроэнергетических ресурсов СССР по состоянию на 1960 г. оценивается в 30%.

за счет сооружения крупных и главным образом тепловых электростанций (на базе дешевых углей, природного газа и мазута), сроки строительства и капитальные затраты на которые меньше, чем на гидроэлектростанции (см. гл. 9). Н. С. Хрущев на тор-

жественном пуске Волжской ГЭС имени В. И. Ленина (август 1958 г.) сказал, что нам надо выиграть время в соревновании с капиталистическими странами, сократить сроки строительства электростанций и при меньших затратах получить больше электроэнергии, а для этого в ближайшие годы надо отдать преимуществу строительству тепловых электростанций.

Тепловые электростанции намечено строить мощностью от 1,0 до 2,4 млн. *квт*, оборудованные агрегатами в 150—200 и даже 300 тыс. *квт* и более (600—1000 тыс. *квт*). Целесообразность постройки крупных тепловых электростанций вытекает из их более высоких энерго-экономических показателей по сравнению с мелкими электростанциями. В стране имеется более 100 тысяч мелких малоэкономичных электростанций. Они вырабатывают около 10% всей электроэнергии, стоимость которой доходит до 10—20 коп. за киловатт-час<sup>1</sup>. Их обслуживает около 800 тысяч человек. В то же время крупные электростанции вырабатывают 90% электроэнергии стоимостью в среднем ниже восьми десятых копейки за киловатт-час и их обслуживает только 200 тысяч человек [7].

Наряду со строительством тепловых и гидравлических электростанций ведется строительство атомных электростанций. Строятся Белоярская, Ново-Воронежская и другие атомные электростанции установленной мощностью по 420 тыс. *квт* и более.

В настоящее время СССР вырабатывает электрической энергии больше, чем вырабатывают ее Англия, ФРГ и Италия, вместе взятые. Среди стран мира СССР по выработке энергии занимает второе место. При мировой выработке электрической энергии в 1959 г. 2054 млрд. *квт-ч* СССР выработал 264 млрд. *квт-ч*, или 12,8%, а США, занимающее первое место, 794 млрд. *квт-ч*, или 38,6%.

За семилетие выработка электрической энергии по стране в целом должна возрасти с 233 млрд. *квт-ч* в 1958 г. до 500—520 млрд. *квт-ч* в 1965 г., что даст прирост в 2,2 раза. Соответственно перспективному плану развития народного хозяйства СССР выработка электрической энергии, по определению Министерства строительства электростанций, должна достигнуть: в 1970 г. — 940 млрд. *квт-ч*, в 1975 г. — 1550 млрд. *квт-ч* и в 1980 г. — 3000 млрд. *квт-ч*. На долю гидроэлектростанций при этом будет приходиться порядка 20%.

В 1965 г. производство энергии на душу населения составит около 2300 *квт-ч* против 1028 *квт-ч* в 1957 г. По производству энергии на душу населения СССР превзойдет к концу семилетия современный уровень Англии, Франции и ряда других стран. Это явится живым воплощением заветов великого Ленина, про-

<sup>1</sup> Здесь и в дальнейшем все цены даны в новом масштабе цен.

возгласившего в 1920 г., что «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

На гидроэлектрических станциях за семилетие (1959—1965 гг.) будет введено около 10 млн. *квт-ч* новой мощности, в то время как в предыдущее семилетие введено 7,4 млн. *квт*. Завершится строительство крупнейшей в мире Братской ГЭС на Ангаре мощностью 4,5 млн. *квт* и будут введены агрегаты еще более мощной Красноярской ГЭС на Енисее (5,0 млн. *квт*). В 1960 г. введена на полную мощность (2,5 млн. *квт*) Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС, войдут в строй Бухтарминская, Кременчугская, Воткинская, Иовская, Кумская, Верхне-Туломская и другие ГЭС. Для строящихся в настоящее время крупных гидроэлектростанций характерно оборудование их очень крупными агрегатами — Братской по 225 тыс. *квт* и Красноярской по 500 тыс. *квт*. Для сравнения укажем, что единичная мощность агрегатов Волжской ГЭС им. В. И. Ленина составляет 115 тыс. *квт* и самой крупной в США гидроэлектростанции Гранд-Кули — 108 тыс. *квт*.

За пределами намеченного семилетия параллельно со строительством крупных тепловых электростанций будет продолжаться строительство гидроэлектростанций, особенно в богатых гидроэнергоресурсами горных районах Средней Азии и Восточной Сибири.

В своей речи 17 января 1961 г. на Пленуме ЦК КПСС Н. С. Хрущев отметил первоочередность строительства гидроэлектростанций на горных реках Средней Азии (Нурекская и др.), так как они, помимо большого энергетического эффекта и соответственного развития промышленности, могут обеспечить дополнительно орошение двух-трех миллионов гектаров плодородных земель.

В Восточной Сибири наиболее благоприятными для энергетического использования являются реки Ангара и Енисей. По утвержденной схеме на Ангаре могут быть построены гидроэлектростанции общей мощностью свыше 15 млн. *квт* с выработкой энергии около 70 млрд. *квт-ч*. При этом мощность построенной Иркутской, строящейся Братской и намечаемой к постройке Усть-Илимской ГЭС составит около 10 млн. *квт*, а выработка энергии 46 млрд. *квт-ч*, или 68% общей выработки всех ангарских ГЭС.

На Енисее намечены гидроэлектростанции суммарной мощностью свыше 25 млн. *квт* с годовой выработкой энергии более 130 млрд. *квт-ч*. Строящаяся Красноярская и проектируемые Саянская и Осиновская ГЭС будут иметь суммарную мощность порядка 15 млн. *квт* с годовой выработкой энергии 65 млрд. *квт-ч*. Предусматривается гидроэнергостроительство и на других реках Сибири и в других районах страны: на Северо-Западе, Дальнем Востоке, в Закавказье и т. д.

Волга, Кама, Днепр, Иртыш, Ангара, Енисей и многие другие реки постепенно превращаются в цепь водохранилищ, коренным образом преобразующих их режим и создающих новые водно-транспортные магистрали. Волга, например, на протяжении от г. Калинина до г. Астрахани будет состоять из 9 водохранилищ общей длиной около 2650 км и полезной емкостью свыше 47 км<sup>3</sup>. Уже построено 6 гидроузлов — Ивановский, Угличский, Рыбинский, Горьковский, Куйбышевский и Сталинградский и один Саратовский находится в процессе строительства. На Каме построен Пермский и строится Воткинский гидроузлы. Для полного завершения каскада, намеченного в последних проектных разработках, должны быть дополнительно построены на Волге Чебоксарский и Нижне-Волжский (Астраханский) и на Каме — Верхне-Камский (Соликамский) и Нижне-Камский гидроузлы (рис. 2.1).

После постройки всех гидроузлов на Волге и Каме суммарная полезная емкость водохранилищ составит около 90 км<sup>3</sup>, что обеспечит практически полное выравнивание стока маловодных лет в низовых створах Волги.

Суммарная площадь водного зеркала водохранилищ на Волге и Каме будет равна около 38 тыс. км<sup>2</sup> [9].

Водохранилище Волжской ГЭС имени В. И. Ленина является наиболее значительным в СССР по площади водного зеркала — 5,9 тыс. км<sup>2</sup>. По объему наиболее значительно водохранилище Братской ГЭС на Ангаре — 179 км<sup>3</sup>. Указанные водохранилища в то же время являются и самыми крупными в мире (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Гидроэлектростанция	Полный объем водохранилища, км <sup>3</sup>	Полезный объем водохранилища, км <sup>3</sup>	Площадь зеркала водохранилища, тыс. км <sup>2</sup>
Братская . . . . .	179,0	50,0	5,50
Красноярская . . . . .	77,5	32,1	2,13
Саньмынься (КНР) . . . . .	64,5	54,7	3,50
Волжская им. В. И. Ленина . . . . .	56,0	15,8	5,90
Бухтарминская . . . . .	53,0	31,0	5,50
Боулдер (США) . . . . .	37,5	31,4	0,59
Рыбинская . . . . .	25,4	11,7	4,55
Грэнд-Кули (США) . . . . .	11,7	6,1	0,29

Верхняя ступень Волжского каскада — Ивановский гидроузел, образовал водохранилище, от которого начинается канал имени Москвы.

Решение проблемы использования Волги тесно связано с реконструкцией смежных бассейнов, и в первую очередь Дона, с которым Волга соединена (рис. 2.1) Волго-Донским каналом имени В. И. Ленина (вступил в строй 27 июля 1952 г.). Соединение Волги с Доном, постройка каскада ГЭС на Волге, сооружение Беломорско-Балтийского канала (1931—1933 гг.) и канала имени Москвы (1932—1937 гг.) и, наконец, намечаемое



Рис. 2.1. Волжско-Камский каскад гидроэлектростанций.

1 — действующие, 2 — строящиеся и проектируемые.

в ближайшее время завершение строительства Волго-Балтийского водного пути являются звеньями колоссальной работы по сооружению единой глубоководной транспортной системы, связывающей между собой моря Балтийское, Белое, Каспийское, Азовское и Черное и превращающей столицу Советского Союза Москву в глубоководный порт пяти морей.

Создание улучшенных воднотранспортных путей в связи с постройкой ряда каскадов имеет колоссальное народнохозяйственное значение, определяющееся непрерывным ростом перевозок грузов и пассажиров по внутренним водным путям СССР. В 1956 г. количество перевезенных грузов составило 146 млн. т,

а объем перевозок — 70 млрд. т/км. За годы пятилеток грузооборот увеличился в 2,5 раза. В ближайшие годы речной транспорт получит еще более значительное развитие — увеличатся перевозки хлеба, леса, угля и других массовых грузов. Произойдут изменения в географическом распределении перевозок по бассейнам вследствие роста перевозок грузов в восточных районах страны.

Успешной реализации планов предстоящих перевозок будет способствовать постоянное улучшение внутренних водных путей. По сравнению с 1913 г. общая протяженность рек, использованных для перевозок в 1956 г., увеличилась в 2,3 раза и составила 132,3 тыс. км. Внутренние водные пути в нашей стране по протяженности почти в 3 раза больше, чем в США, и в 4,5 раза больше, чем во Франции, ДРГ и ФРГ, Бельгии и Голландии, вместе взятые.

Наряду с количественными изменениями произошли качественные изменения на водных путях. По основным магистралям — Волге, Каме, Оке, Северной Двине и Днепру — гарантийные глубины увеличились более чем в 1,5 раза, а на Дону с вводом Цимлянского водохранилища — более чем в 3 раза [10].

Но не только решением энергетических и воднотранспортных задач интересна проблема реконструкции Волги и смежных с ней бассейнов. Одновременно также решается и задача проведения в широких масштабах мероприятий по сельскохозяйственному орошению тяготеющих к этим рекам засушливых земель, обводнению больших пространств и т. д.

Созданием каскада водохранилищ и гидроэлектростанций на Днепре, на котором уже работают Днепрогэс, Каховская и Кременчугская ГЭС, решается тот же комплекс задач по гидроэнергетике, водному транспорту, орошению, водоснабжению, рыбному хозяйству и т. д. (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Днепровский каскад гидроэлектростанций.

1 — действующие, 2 — строящиеся и проектируемые.

В этом каскаде большое внимание привлекают к себе установки на Верхнем Днепре, в частности Кременчугская, в верхнем бьефе которой создано водохранилище, обеспечивающее значительное регулирование стока. Это окажет существенное влияние на Днепрогэс (а также Каховскую ГЭС), работающую в настоящее время практически на незарегулированном стоке и, как следствие, с относительно низким коэффициентом использования его.

Весьма большой интерес с воднохозяйственной точки зрения представляет постройка Бухтарминской ГЭС на Иртыше с очень большим водохранилищем по отношению к среднему годовому стоку в створе ГЭС (167%). Являясь самым верхним в каскаде, Бухтарминское водохранилище (площадь зеркала 5,5 тыс. км<sup>2</sup>) обеспечивает очень высокую степень регулирования стока не только для своей ГЭС, но и для всех ниже лежащих: Усть-Каменогорской, Донской, Шульбинской и др. Особенно эффективным Бухтарминское водохранилище оказывается для непосредственно ниже расположенной уже работающей Усть-Каменогорской ГЭС (а в будущем Донской ГЭС), поскольку емкость ее верхнего бьефа ничтожно мала, из-за чего она вынуждена работать на незарегулированном водотоке с низкой гарантированной мощностью и низким коэффициентом использования стока. Одновременно с решением энергетических и водотранспортных задач постройка гидроузлов на среднем участке Иртыша (от г. Усть-Каменогорска до г. Омска) открывает большие возможности для орошения, обводнения и водоснабжения как районов, непосредственно тяготеющих к Иртышу, так и районов Центрального Казахстана.

По разнообразию решаемых воднохозяйственных проблем, как уже отмечалось, большой интерес представляет Мингечаурская установка на Куре. Помимо удовлетворения требований орошения и обводнения, энергетики, водного транспорта, рыбного хозяйства, Мингечаурское водохранилище позволяет зарегулировать паводки. В естественных условиях паводки часто достигали таких размеров, при которых пойма в нижнем течении реки затапливалась, чем наносился огромный ущерб народному хозяйству. По существу, практическое использование плодороднейших земель поймы Куры было невозможно. Совершенно иное положение создалось после ввода в эксплуатацию Мингечаурского водохранилища. Теперь эти земли используются в плановом порядке.

Очень интересна проблема использования р. Раздан, берущей начало в высокогорном озере Севан. Проектом предусмотрено использование вековых запасов воды оз. Севан на напоре каскада ГЭС путем понижения в течение ряда лет его уровня. При понижении уровня уменьшится поверхность озера, а с ним уменьшатся и потери воды на испарение. Разность потерь на



испарение в естественных условиях и в проектных обратится в сток р. Раздан, который также будет использован на напоре Севано-Разданского каскада, а территория, освобождающаяся из-под воды при понижении уровня оз. Севан, может быть освоена для сельского хозяйства. Таким образом, достигается использование дополнительного стока на каскаде ГЭС первоначально за счет искусственного понижения уровня оз. Севан, а в последующее время — за счет изменившегося водного баланса.

Использование воды вековых запасов оз. Севан начато с 1933 г. и к 1 января 1961 г. уровень озера понизился на 12 м.

В связи с проблемой оз. Севан, однако, следует заметить, что не все специалисты разделяют точку зрения, принятую в проекте. Например, В. П. Валесян считает, что уменьшение зеркала оз. Севан не может дать ожидаемого большого эффекта ввиду значительного испарения с освобождающегося из-под воды дна Большого Севана, если не будут проведены дорогостоящие мероприятия по его дренированию. Поэтому он рекомендует сохранить уровень озера на возможно высокой отметке, т. е. приостановить дальнейшую сработку вековых запасов воды оз. Севан (см. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI, 1959).

С точки зрения перераспределения водных ресурсов между бассейнами большой интерес представляет проблема переброски стока северных рек (Печоры и Вычегды) через Каму и Волгу в Каспийское море. Объем ежегодно перебрасываемого стока в среднем составит около 40 км<sup>3</sup>, что по отношению к естественному среднему годовому стоку Волги дает 16%. За счет этой воды в районах Куйбышева, Саратова и Сталинграда будут дополнительно орошаться сельскохозяйственные земли на площади свыше двух миллионов гектаров, улучшится водный баланс Каспийского моря, увеличится ежегодная выработка энергии на Камско-Волжском каскаде гидроэлектростанций на 11 млрд. квт-ч, т. е. на столько, сколько вырабатывает Волжская ГЭС имени В. И. Ленина. Одновременно эта переброска стока «освежающе» повлияет на воды Камы и Волги, улучшит их санитарное состояние, что благоприятно скажется на рыбном хозяйстве, полнее будут использоваться дары нижеволжской жемчужины — Волго-Ахтубинской поймы. Помимо указанного, с постройкой сооружений, входящих в Камско-Печорско-Вычегодский комплекс, откроется удобный водотранспортный путь из северных районов страны к Каспию.

Большое народнохозяйственное значение проблемы переброски стока с севера на юг было подчеркнуто на январском Пленуме ЦК КПСС (1961 г.). О нем говорил в своей речи Н. С. Хрущев.

В отношении перераспределения водных ресурсов между бассейнами значительный интерес представляет также проблема

комплексного использования Кубани. Наиболее характерной особенностью этой проблемы является огромный размах обводнительных мероприятий, охватывающих площадь около 8 млн. га, расположенных за пределами ее бассейна — в Ставропольском крае, Ростовской области и Краснодарском крае. Другая особенность этой проблемы состоит в том, что в низовьях самой Кубани создается новый район рисосеяния площадью до 100 тыс. га. Основными звеньями оросительно-обводнительной системы Кубани являются Невинномысский (Кубань-Егорлыкский), Кубань-Калаусский и другие каналы, которые обеспечивают маловодные и безводные районы достаточным количеством доброкачественной воды, необходимой для водоснабжения, а также для орошения сельскохозяйственных культур на площади в несколько сотен тысяч гектаров. На этих землях, кроме риса, возделываются овощные, плодовые, технические и зерновые культуры, а также виноградники.

В общехозяйственной проблеме Кубани значительное место занимают также и вопросы защиты прикубанских земель от наводнений (путем регулирования паводков водохранилищами и устройством дамб обвалования), использования водной энергии и улучшения транспортных условий по самой Кубани и Маньчскому судоходному каналу, вода в который поступает по Невинномысскому каналу и р. Егорлык. Одновременно решается и задача развития рыбного хозяйства как в обводняемых реках, так и в водохранилищах. Большая часть работ по проблеме Кубани уже завершена.

В заключение кратко обзора развития отечественного водохозяйственного строительства за истекший период и в текущее семилетие (1959—1965 гг.) остановимся на проблеме улучшения водного баланса обширных районов Средней Азии и Арало-Каспийской низменности.

Неблагоприятный водный баланс этих районов, складывающийся под влиянием климатических условий (мало количества осадков и большого испарения), в дальнейшем станет еще менее благоприятным вследствие дополнительного изъятия воды на проведение оросительных и обводнительных работ в крупных масштабах и дополнительных потерь на испарение с поверхности водохранилищ, создаваемых в бассейне Волги (в основном питающей Каспийское море), Аму-Дарьи, Сыр-Дарьи, Чу, Или и др. Годовое количество атмосферных осадков здесь не превышает 300 мм, а в ряде равнинных мест падает до 70 мм и даже меньше. Благодаря повышенной проницаемости почв поверхностный сток незначителен или вовсе отсутствует. Речная сеть развита слабо. Из-за недостатка естественной влаги невозможно вести сельское хозяйство без искусственного орошения. Между тем Арало-Каспийская низменность обладает огромным земельным фондом, пригодным по почвенным условиям и релье-

ефу под поливное земледелие, а большое количество солнечного тепла создает благоприятные предпосылки для выращивания хлопка, риса, каучуконосов, цитрусовых и пр. Всего под орошаемое земледелие здесь пригодно не менее 250 млн. га. По оценке М. М. Давыдова, местным стоком (бассейны Аму-Дарьи, Сыр-Дарьи и Чу—Балхаша) возможно оросить не более 10—13 млн. га, т. е. только 4—5% земельных ресурсов. Остальная часть земли может быть орошена лишь за счет привлечения вод из других бассейнов.

Имеется несколько вариантов переброски части стока северных и сибирских рек в Арало-Каспийскую низменность. По грандиозности замысла обращает на себя внимание проект переброски стока из бассейнов рек Оби и Енисея. По этому проекту намечается постройка гидроузла на Оби у Белогорья (ниже впадения Иртыша) и затем гидроузлов на Енисее и Кети (приток Оби), а также водораздельного канала Енисей—Кеть, по которому вода из Енисея будет перебрасываться в Обь, и далее в Арало-Каспийскую низменность по каналу через Тургайский водораздел.

Первоначально намечается постройка только одного Белогорьевского водохранилища на пониженную отметку подпорного уровня (площадь зеркала 124 тыс. км<sup>2</sup>) и переброска стока из Оби в размере 1000 м<sup>3</sup>/сек, а в перспективе после поднятия подпора на Белогорьевском сооружении (площадь зеркала 272 тыс. км<sup>2</sup>) и постройки всех других сооружений переброска составит 8500 м<sup>3</sup>/сек (круглогодично).

Переброска стока в таких огромных количествах, равных суммарному стоку всей Волги, коренным образом изменит природные условия ныне засушливого края и даст толчок к интенсивному развитию его производительных сил.

Осуществление Обь—Енисей—Арало-Каспийской проблемы — дело отдаленного будущего, но разработка ее полезна тем, что она позволила выявить возможности дальнейшего развития водного хозяйства СССР за счет перераспределения водных ресурсов на больших территориях.

Работы по комплексному решению водохозяйственных проблем осуществляются не только в описанных выше районах, но и в бассейнах многих других рек Советского Союза.

Огромные достижения гидротехники послереволюционного периода стали возможными благодаря бурному расцвету советской гидротехнической науки — гидравлики открытых русел и сооружений (Н. Н. Павловский, М. Д. Чертоусов, А. Н. Ахутин и др.), теории движения наносов и эрозии русел (М. А. Великанов, В. Н. Гончаров, И. И. Леви и др.) и т. д. Очень глубоко в СССР разработаны вопросы водных исследований, гидрологии и водохозяйственных расчетов (Е. В. Близняк, Д. Л. Соколов-

ский, А. В. Огиевский, Л. К. Давыдов, С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель и др.).

На строительстве и проектировании гидротехнических сооружений и систем в различных областях водного хозяйства сформировались высококвалифицированные кадры и полностью раскрылось творчество талантливых инженеров и ученых.

В этой связи особо следует отметить выдающиеся заслуги Б. Е. Веденева, А. В. Винтера, П. П. Лаупмана и др. — строителей Волховской, Днепровской имени В. И. Ленина и других гидроэлектростанций; И. Г. Александрова — автора проекта Днепровской, Чирчикских гидроэлектростанций, схемы использования Ангары, проектов орошения Заволжья и др.; Г. О. Графтио — строителя Волховской и Нижне-Свирской ГЭС, С. Я. Жука — возглавлявшего проектирование и строительство крупнейших гидротехнических комплексов: Беломорско-Балтийского канала, канала имени Москвы, Волго-Донского канала имени В. И. Ленина, Волжской ГЭС имени Ленина и др.; Г. К. Ризенкампа — автора проекта и строителя оросительных систем в Голодной степи и др.

#### **Примеры водохозяйственного строительства в капиталистических странах**

Капиталистический мир также располагает значительными водными ресурсами. Однако рациональное их использование встречает там большие затруднения из-за наличия противоречий, возникающих между отдельными предпринимателями и землевладельцами, владения которых попадают в зону затопления при устройстве водохранилищ, а также вследствие иногда непреодолимых противоречий в интересах отдельных областей (в США — штатов), крупных капиталистических компаний и государств и т. д. Корни этих противоречий заключаются не столько в природных и технических факторах, сколько в социально-экономических. Из-за непримиримости различных интересов в капиталистических странах многие крупные водные проблемы, сулящие большие выгоды национальному хозяйству, не приводятся в исполнение или решаются односторонне, без учета всего комплекса задач. Нередко осуществление водохозяйственного строительства по указанным причинам откладывается на многие годы и десятилетия.

Разительны примеры нерационального и порой хищнического использования водных ресурсов в США, чего не могут скрыть и сами правящие круги этой страны.

Так, во времена президентства Трумэна была организована комиссия специалистов по разработке вопросов, связанных с использованием водных ресурсов. В отчете о своей деятельности комиссия вынуждена была признать: «Мы плохо использовали

воду, без подлинного уважения к ее естественному кругообороту, превратив ее из друга во врага. Мы уничтожили леса, оставив бесплодными, обнаженными горные склоны, с которых беспрепятственно стекают дождевые и талые воды; мы до угрожающих размеров усилили эрозию почвы, допустив смыв драгоценного почвенного покрова в море, загрязнение наших рек, заиливание водохранилищ и увеличение опасности наводнений»<sup>1</sup>.

Президентская комиссия ограничилась рассмотрением положения дел в гидротехническом строительстве на сравнительно второстепенных водотоках — Коннектикуте, Потомаке и др. — и старалась не привлекать внимания к тем рекам, на которых осуществление крупного строительства особенно необходимо, но срывается действиями влиятельных монополий.

Характерен в этом отношении пример с использованием крупнейшей реки США — р. Св. Лаврентия. На этой реке, протекающей по границе с Канадой, имеются весьма благоприятные условия для крупного гидротехнического строительства. Она многоводна, имеет большое падение (около 180 м), хорошо зарегулирована Великими озерами. В естественных условиях транспортному освоению на участке от выхода из оз. Онтарио до Монреаля мешают пороги. Крупное гидротехническое строительство позволило бы решить здесь комплексную задачу создания сквозного глубоководного пути от Атлантического океана до Великих озер (протяжением в 3500 км) и получения мощных источников дешевой электроэнергии. Давно составлен проект строительства плотин и гидроэлектростанций на р. Св. Лаврентия, но к осуществлению его в широких масштабах приступлено лишь в самое последнее время.

Причина срыва строительства, по высказыванию Д. Сельдеса<sup>2</sup>, заключается в том, что еще в 1902 г. крупные монополии — алюминевый трест Меллона, химический трест Дюпона и моргановский электротехнический трест «Дженерал электрик» объединились с целью захватить в свои руки и монополично использовать водные ресурсы р. Св. Лаврентия. Однако не менее влиятельные другие монополии решительно воспротивились этому, в результате чего было принято решение об осуществлении строительства государством. Тогда Морган и его компаньоны решили вообще сорвать строительство на этой реке, используя подкуп чиновников, конгрессменов и прессы, и начали строительство гидроэлектростанций на ее притоках (на территории Канады).

Потребовалось более 50 лет, чтобы преодолеть сопротивление капиталистических группировок и приступить к комплексному гидротехническому строительству на р. Св. Лаврентия,

<sup>1</sup> A water policy for the American people. Washington, 1950, стр. 2.

<sup>2</sup> Дж. Сельдес. 1000 американцев. 1948, М., стр. 48—62.

которое совместно ведется Канадой и США. Окончание работ было запланировано по судоходным сооружениям на 1959 г. и по энергетическим объектам на 1960 г.

Аналогичное положение имело место и при использовании водных ресурсов других крупных водотоков США — Миссисипи и ее притока Миссури, Колорадо, Колумбии, Теннесси и др.

Например, использование водных ресурсов р. Теннесси было начато только с целью получения дешевой электроэнергии, несмотря на необходимость комплексного гидротехнического строительства, при котором также решались бы и задачи борьбы с разрушительными наводнениями как на самой р. Теннесси, так и на р. Огайо, куда она впадает, улучшения условий водного транспорта и т. п.

Гидротехническое строительство на р. Колумбии также начиналось с целью получения дешевой электроэнергии в основном для бурно развившейся там военной промышленности, среди которой особое место занял крупнейший комбинат атомной промышленности у г. Хэнфорда. Другие же проблемы водного хозяйства, в частности орошение сельскохозяйственных земель и борьба с наводнениями, здесь не получили должного разрешения.

Даже в такой передовой в гидротехническом отношении стране, как Швеция, уже много лет не осуществляется проект регулирования стока на базе крупнейшего в стране озера Миларен, близ Стокгольма, так как выгоды, которые получит водный транспорт, противоречат интересам земельных собственников.

#### Литература

1. Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеиздат, Л., 1959.
2. Давыдов Л. К. Гидрография СССР. Изд. ЛГУ, 1953.
3. Вознесенский А. Н. Гидроэнергетические ресурсы СССР и перспективы их использования. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. 1. Гидрометеиздат, Л., 1958.
4. Зюзик Д. Т. Экономика водного хозяйства. Сельхозгиз, М., 1959.
5. Фесенко Н. Г. Вопросы охраны рек от загрязнения воды промышленными предприятиями на примере бассейна р. Сев. Донца. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. X. Гидрометеиздат, Л., 1959.
6. Попов В. И. и Саркисян А. А. Характеристика наводнений на реках бассейна верхнего и среднего Амура. Сб. «Перспективы использования гидроэнергии и борьба с наводнениями в бассейне верхнего и среднего Амура». Изд. АН СССР, М., 1959.
7. Новиков И. Т. Речь на июльском Пленуме ЦК КПСС. Пленум ЦК КПСС 13—16 июля 1960 г. Госполитиздат.
8. Абдурагимов Т. И., Бережнов П. А. и др. Развитие водного хозяйства СССР и союзных республик за 40 лет. Гидротехника и мелиорация, № 9—12, 1957.
9. Коренистов Д. В. Водный баланс р. Волги в связи с сооружением Волжско-Камского каскада гидроузлов. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI. Гидрометеиздат, Л., 1959.

10. Черевко П. В. Итоги и задачи гидрологических исследований на внутренних водных путях. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI. Гидрометеиздат, Л., 1959.
11. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. и Чеботарев А. И. Водохозяйственное строительство в СССР и задачи гидрологии. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. I. Гидрометеиздат, Л., 1958.
12. Гинко С. С. Водноэнергетические богатства СССР, их изучение и использование. Гидрометеиздат, Л., 1955.
13. Зима Л. Природные ресурсы США и их использование. Географиз, М., 1954.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ТРЕБОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЕЙ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА НА ВОДУ. НОРМЫ И РЕЖИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДЫ

В народном хозяйстве вода используется для водоснабжения населенных мест и промышленных предприятий, выработки электрической энергии, сельскохозяйственного орошения, для водного транспорта, рыбного хозяйства и т. д., причем в большинстве случаев комплексно.

Для условий СССР характерным является прогрессивное увеличение использования воды, определяемое общим развитием народного хозяйства. В водохозяйственных расчетах практический учет прогрессирующего роста водоиспользования ведется путем рассмотрения нескольких законченных этапов развития народного хозяйства. Эти этапы обычно приурочиваются к за-проектированным в государственном масштабе конкретным перспективным планам развития народного хозяйства (пятилетки, семилетка) в соответствии с намеченными сроками строительства и ввода в эксплуатацию водохозяйственной установки и развития ее мощности. Ввод в эксплуатацию крупных установок иногда осуществляется очередями — первоначально на часть мощности с последующим доведением ее до проектной величины, что диктуется народнохозяйственными соображениями, условиями производства строительных работ, гидрологическим режимом водотока и т. п.

Рассмотрению подлежит уровень потребления и соответственно работа водохозяйственной установки как в первые годы ее эксплуатации, т. е. примерно в течение 3—5-летнего срока, так и в последующие годы, через 10—15 лет от начала ее работы.

Дополнительно рассматривается потребление на отдаленную перспективу в тех случаях, когда проектом охватывается развитие народного хозяйства на большой срок вперед, в связи с чем условия работы установки значительно изменяются, или при особых обстоятельствах, например, если необходим учет заилиения



водохранилища, или при большой длительности срока от начала наполнения водохранилища до перехода на нормальную эксплуатацию.

Потребление воды неравномерно в течение года, недели, суток. Внутригодовые изменения водопотребления обуславливаются в основном годовым циклом в природе (сменой климатических сезонов), а также сезонностью работы некоторых предприятий и даже целых отраслей народного хозяйства. Недельная неравномерность определяется производственными условиями — наличием выходных дней, когда потребление меньше, чем в рабочие дни. Суточная неравномерность обуславливается как производственными (работой предприятий неполные сутки), так и бытовыми условиями (уменьшение потребности в ночные часы).

У одних отраслей народного хозяйства указанная неравномерность водопотребления выражена более резко, у других — менее.

Рассмотрим особенности режима водопотребления отдельными отраслями народного хозяйства и установим потребляемое ими количество воды. Знание количества и режима потребления воды имеет первостепенное значение при проектировании, так как этими элементами в значительной мере определяются параметры водохозяйственной установки и режим ее работы.

## § 1. ВОДОСНАБЖЕНИЕ

Снабжение водой населенных мест, промышленных предприятий и сельского хозяйства является одной из важнейших народнохозяйственных задач.

Вода расходуется на удовлетворение:

а) хозяйственно-питьевых нужд в жилых домах и коммунальных предприятиях (банных, прачечных, больницах и пр.), на потребление воды рабочими во время пребывания их на производстве, поливку улиц и зеленых насаждений и пр.;

б) производственного потребления на предприятиях промышленности, транспорта, энергетики и сельского хозяйства (парообразование, конденсация пара, охлаждение, изготовление фабрикатов, промывка продукции и т. п.);

в) потребностей пожаротушения.

### Требования к качеству воды

При водоснабжении предъявляются высокие требования к качеству воды. Состав и количество находящихся в воде веществ неорганического и органического происхождения и микроорганизмов определяют качество воды, степень пригодности ее для питья и разнообразных нужд хозяйства.

Наиболее строгие требования предъявляются к питьевой воде для человека. Вода должна быть прозрачной, не иметь запаха и

привкуса, не должна содержать вредные соли и бактерии, обладать умеренной жесткостью, не быть загрязненной и т. п.

### Нормы хозяйственно-питьевого водопотребления

Количество воды, необходимое для удовлетворения хозяйственно-питьевых и производственных потребностей обслуживаемого водохозяйственной установкой района, определяется нормами водопотребления, численностью населения, производительностью и характером производства, численностью животных в сельском хозяйстве и т. д.

Существующими нормами предусматривается потребление хозяйственно-питьевой воды в сутки на одного жителя или на одного работающего на предприятии, на одну голову животного, а расходование воды для производственных целей — на единицу выпускаемой продукции.

Нормы потребления хозяйственно-питьевой воды населением зависят от благоустройства населенных мест и жилых зданий, климатических условий, доступности воды, а следовательно, от степени совершенства самого водоснабжения, от условий отвода использованной воды (канализации) и т. д.

Расходование хозяйственно-питьевой воды меняется по сезонам года и в пределах суток, поэтому при проектировании водоснабжения необходимо определить также и вероятную максимальную суточную норму и часовой максимум.

В зависимости от санитарно-технического оборудования зданий района нормы хозяйственно-питьевого водопотребления населением находятся в следующих пределах (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Характеристика зданий	Норма <sup>1</sup> , л		Коэффициент часовой неравномерности <sup>2</sup>
	средняя суточная	максимальная суточная	
Без водопровода и канализации . . .	40—60	50—70	2,0—1,4
С водопроводом и канализацией . . .	50—90	65—100	1,6—1,4
С водопроводом, канализацией, ванными и центральным горячим водоснабжением . . . . .	160—210	185—240	1,25—1,15

<sup>1</sup> Нижние пределы приведенных норм относятся к северным районам СССР, верхние — к южным.

<sup>2</sup> Отношение максимального часового потребления к среднему.

Для отдельных крупных городов нормы водопотребления устанавливаются в индивидуальном порядке. Например, в проекте реконструкции московского водопровода предусмотрена норма 600 л/сутки, из которых 100 л приходится на нужды промышленных предприятий, питающихся из городского водопровода.

Для курортов суточная норма водопотребления устанавливается в 250—400 л на одного курортника.

На хозяйственные нужды во время пребывания рабочих на производстве норма потребления воды принимается равной 25—35 л. Сверх того на грязных производствах предусматривается расход воды на души в размере 40—60 л/сутки на одного человека.

Расходование воды на пожаротушение регламентируется специальными нормами.

Общий среднесуточный объем воды на хозяйственно-питьевые нужды можно определить по выражению

$$S = q_{\text{ср. сут}} N \text{ л,}$$

где  $N$  — число жителей на расчетный уровень развития района (с учетом естественного прироста и увеличения народонаселения за счет расширения промышленности и хозяйства).

### Режим хозяйственно-питьевого водопотребления

Рассмотрим графики колебаний объемов хозяйственно-питьевого потребления воды в течение суток, свойственные средним (рис. 1.2 а) и крупным городам (рис. 1.2 б). На этих графиках по оси ординат отложены величины часовых объемов воды, выраженные в процентах от суточного объема  $S$ , а по оси абсцисс — часы суток. В первом случае (рис. 1.2 а) коэффициент часовой неравномерности (отношение максимальной ординаты к средней, равной  $\frac{100}{24} = 4,17\%$ ) составляет 1,50, а во втором 1,25.

### Нормы сельскохозяйственного водопотребления

Расход воды в скотоводческих хозяйствах зависит от вида животных.

Нормами предусматривается водоснабжение непосредственно в скотоводческих помещениях и на пастбищах. На одну молочную корову, например, расходуется воды в помещениях 70—95 л (без водопровода), а на пастбищах 60—75 л. На одну овцу расходуется воды в помещениях 8—10 л, а на пастбищах 6—8 л.

Другие потребности в воде сельского хозяйства (при работе сельскохозяйственных машин, на переработку сельскохозяйственной продукции и т. п.) оцениваются специальными нормами.

## Нормы промышленного водопотребления

Расход воды на единицу промышленной продукции очень часто бывает разным даже на аналогичных предприятиях, так как он зависит от схемы технологического процесса, местных условий, типа оборудования и других причин. В тех случаях, когда вода подается на охлаждение машин, на непосредственное охлаждение изделий и полуфабрикатов, на установки и устройства для конденсации пара, расход производственной воды также зависит и от ее температуры.

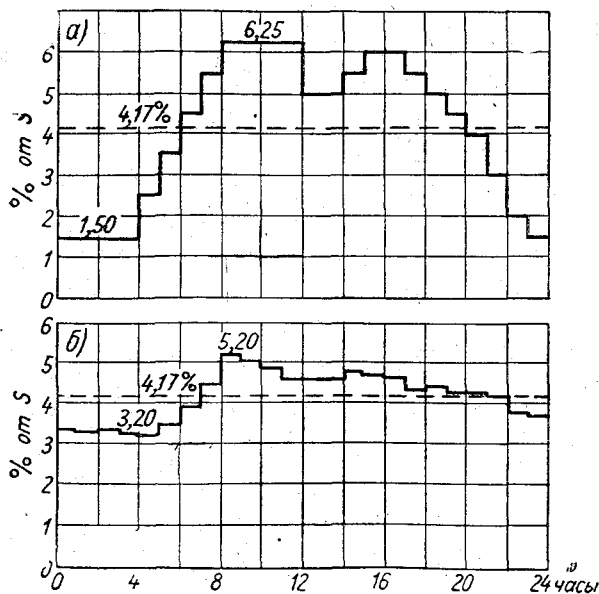


Рис. 1.2. Графики изменения потребления воды в течение суток.

Приведем весьма ориентировочные нормы водопотребления для некоторых производств.

Металлургические заводы: на 1 т чугуна с переделом — свежей воды 10—25 м<sup>3</sup>, оборотной воды 150—200 м<sup>3</sup>.

Бумажные фабрики: на 1 кг бумаги — свежей воды 0,4—0,8 м<sup>3</sup>.

Текстильные фабрики: на 1 м хлопчатобумажной ткани — 28—50 л.

Интересно отметить, что водоснабжение крупного промышленного предприятия, например завода черной металлургии, по количеству подаваемой воды значительно превосходит хозяйственно-питьевое водоснабжение крупного города.

Например, для завода с завершенным циклом производства, выпускающего 1,5 млн. *t* продукции в год, суточный расход воды составляет около 1 млн.  $m^3$ , а для города с 1 млн. жителей при норме 150—200 л требуется воды 150—200 тыс.  $m^3$ .

### Режим промышленного водопотребления

Неравномерность расходования производственной воды по сезонам года и в течение суток различна на предприятиях разных отраслей промышленности. Часто эта неравномерность обуславливается различной температурой воды в поверхностном источнике водоснабжения в разное время года; тогда расход воды, идущей на охлаждение, в летнее время больше, чем зимой.

При выборе источника водоснабжения нужно обращать внимание как на внутригодовой ход температуры, так и на ее среднегодовое значение.

Температурный режим естественных водотоков определяется климатом и условиями питания. Средняя годовая температура некоторых рек Сибири колеблется в пределах 4,0—6,6° (Ангара, Енисей, Кия и др.); рек Урала от 4,5 (Сосьва) до 8,5° (Миасс у Челябинска); Москвы, Оки, Волги, Невы от 8,5 до 9,2°; Сыр-Дарьи — 12—13° и т. д. Температура воды в озерах и водохранилищах также подвержена колебаниям. Она находится в зависимости от климата, условий питания, характера водоема и т. д.

Относительно суточной неравномерности водопотребления в промышленности следует отметить, что по крупному промышленному предприятию, работающему в три смены, коэффициент часовой неравномерности, как правило, небольшой и принимается в пределах 1,2—1,1. В тех случаях, когда возникает большая суточная неравномерность в отдельных звеньях предприятия, рекомендуется для них устраивать запасные баки с целью необходимого перерегулирования расходов воды.

### Водоснабжение тепловых электрических станций

Особое место занимает вопрос водоснабжения тепловых электростанций, так как очень часто их приходится строить в районах, бедных водой.

На тепловых электростанциях вода расходуется для: а) выработки пара в котлах (1 л воды на 1 кг пара), б) конденсации отработавшего пара и других нужд.

Расход воды на водоснабжение тепловой электростанции зависит от масштаба установки, типа оборудования и естественных условий, а также от наличия или отсутствия отбора пара для технологических потребностей промышленных предприятий. Не вся вода, расходуемая на водоснабжение тепловой электростанции, а часто и других промышленных предприятий, полностью

утилизируется. Значительная часть охлаждающей воды может быть возвращена в источник или на охладительные и очистительные сооружения для повторного использования.

Система водоснабжения, основанная на повторном использовании воды, называется оборотной, а не предусматривающая повторного использования воды — прямоточной. В отдельных случаях применяется смешанная система водоснабжения.

К оборотной системе водоснабжения обычно прибегают при недостаточной мощности природного источника или большой стоимости подачи из него требуемого количества воды (например, вследствие большой высоты качания воды или удаленности источника). При оборотной системе из источника водоснабжения только добавляется некоторое количество «свежей» воды для пополнения потерь при обороте, в то время как при прямоточной системе из того же источника забирается все время полный расход. Количество свежей воды составляет обычно незначительную часть (3—7%) от общего количества используемой воды. Свежая вода расходуется на восполнение потерь пара в паропроводящей сети и на покрытие потерь на испарение.

Удельный расход охлаждающей воды на 1 квт установленной мощности составляет: на электростанциях, оборудованных крупными турбинами высокого давления, 0,16—0,20 м<sup>3</sup>/час; крупными турбинами среднего давления 0,20—0,25 м<sup>3</sup>/час; малыми турбинами среднего давления (мощностью 2,5—6,0 тыс. квт) 0,35—0,45 м<sup>3</sup>/час.

Суммарный расход воды на тепловых электростанциях различной мощности, необходимый для охлаждения и других технических целей, приведен в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Мощность на турбинах, тыс. квт . . . . .	300	200	100	50	25	12
Расход воды, тыс. м <sup>3</sup> /час:						
при среднем давлении . .	60—75	40—50	20—26	10—13	5—6	2,5—3
при высоком давлении . .	48—60	32—40	16—20	8—10	4—5	—

Таким образом, суммарный расход воды на водоснабжение тепловой электростанции мощностью 300 тыс. квт составит 13—20 м<sup>3</sup>/сек, в том числе на восполнение потерь 1—1,5 м<sup>3</sup>/сек.

Наибольшее количество воды идет на охлаждение конденсаторов. Конденсация пара связана с выделением тепла, которое отводится охлаждающей водой.

Отношение весовых расходов охлаждающей воды и конденсируемого пара называется кратностью охлаждения. В зависимости от устройства конденсаторов кратность охлаждения составляет от 50 до 70 для так называемых многоходовых конденсаторов и от 100 до 110 для одноходовых конденсаторов.

Расход охлаждающей воды определяется ее температурой, которая находится в зависимости от системы водоснабжения. При прямоточной системе охлаждающая вода забирается непосредственно из источника, температура в котором, как известно, подвержена обычно значительным колебаниям. При оборотной системе охлаждающая вода забирается из охлаждающих устройств, температура в которых меньше колеблется главным образом за счет более высокой, чем в естественном источнике, зимней температуры. Отсюда при прямоточной системе водоснабжения расход охлаждающей воды в холодное время может быть значительно снижен (до 0,6 от летнего). В аналогичных соотношениях находится и расход воды для других нужд электростанции.

При оборотной системе водоснабжения в качестве охлаждающих устройств применяются: а) пруды-охладители, б) брызгальные бассейны и в) градирни.

Во всех схемах охлаждающих устройств охлаждение воды происходит вследствие частичного ее испарения и непосредственной отдачи тепла более холодному воздуху (т. е. конвекцией). Охлаждающий эффект пропорционален поверхности охлаждения, поэтому необходимо стремиться к увеличению последней.

В прудах это достигается распределением теплой воды по зеркалу водоема, в брызгальных установках — созданием фонтанов мелких капель и в градирнях — раздроблением на капли воды, падающей с одного яруса решетника на другой (капельные градирни), или образованием водяной пленки на вертикальных щитах (пленочные градирни).

Прудами-охладителями могут служить естественные озера и искусственные водоемы-пруды.

В прудах охлаждение поступающей воды происходит на пути от места сброса до водоприемных устройств. Охлаждающая способность пруда характеризуется не всей площадью зеркала  $F_3$ , а ее активной зоной  $F_a$ , под которой понимают площадь такого фиктивного пруда, для которого начальная (у места сброса) и конечная (у водоприема) температура воды та же, что и для рассматриваемого пруда, но в котором все струи потока параллельны, а следовательно отсутствуют водовороты.

Практика показывает, что рационально устроенный пруд имеет  $F_a \cong 0,85 F_3$ . При этом соотношение между  $F_a$  и  $F_3$ , называемое коэффициентом использования зеркала пруда, зависит от формы поверхности и при вытянутой форме оно больше, чем при округлой форме.

Предельные значения коэффициента использования зеркала, известные из практики, равны 0,9—0,4.

Определение активной зоны пруда и вероятной температуры охлажденной воды при заданных метеорологических условиях производится на основе специальных тепловых расчетов.

Температура воды, охлажденной в градирнях или брызгальных установках, в течение года меняется (рис. 2.2); максимальные значения температуры воды превосходят средние месячные на 5—8°.

## § 2. ОРОШЕНИЕ И ОБВОДНЕНИЕ

### Задачи орошения

Основным условием увеличения сельскохозяйственного производства является улучшение почвы, повышение ее плодородия.

В. Р. Вильямс так определил понятие плодородия почвы: «Плодородием почвы мы называем способность почвы удовлетворять потребность растений в земных факторах жизни — в воде и пище». Другими факторами жизни и развития растений являются свет и тепло.

Для получения максимального урожая сельскохозяйственных культур свет, тепло, вода и пища должны поступать к растению непрерывно и в необходимых количествах.

Из почвы пища поступает в растение с водой через корневую систему. Следовательно, вода и пища должны находиться в почве одно-

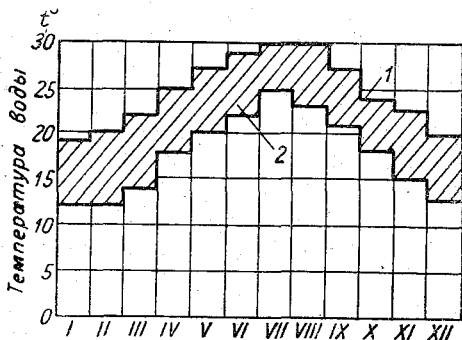


Рис. 2.2. Графики максимальных (1) и средних месячных температур (2) охлаждающей воды при оборотной системе водоснабжения с градирнями или брызгальными установками.

временно и в определенном соотношении. Недостаток воды угнетает растения и от них в почве остается мало органических веществ и перегноя; избыток воды затрудняет приток в почву воздуха и кислорода, необходимых для нормального прохождения почвенных процессов, почва становится бесструктурной и превращается в бесплодное болото.

Несоответствие между наличием в почве количества воды и пищи, воды и воздуха устраняется созданием комковатой структуры почвы (диаметр комков от 1 до 10 мм), а также регулированием притока воды.

Комковатость структуры почвы, где это необходимо, обеспечивается рядом агротехнических и других мероприятий.

Количество воды, необходимое растению за вегетационный период, равно  $R = ky$ , где  $y$  — вес сухого вещества урожая,  $k$  — коэффициент транспирации, представляющий отношение веса воды, транспирируемой растением за вегетационный период, к весу сухого вещества, накопленного им за тот же период.



Количество воды, транспирируемое растениями, огромно. Однако только 0,15—0,20% ее усваивается растениями, а остальные 99,80—99,85% лишь проходит через них, чтобы постоянно поддерживать все ткани растения в состоянии насыщения водой.

Коэффициент транспирации весьма различен для разных растений; он зависит также и от условий произрастания растений. Для некоторых сельскохозяйственных культур коэффициент транспирации находится в следующих пределах (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Культура	Коэффициент транспирации	Культура	Коэффициент транспирации
Пшеница . . . . .	1530—235	Картофель . . . . .	636—281
Рожь . . . . .	724—377	Сахарная свекла . . . . .	397—280
Кукуруза . . . . .	369—233	Капуста, редис . . . . .	743—539

Величина  $R$ , зависящая от веса урожая, вида культуры, почвенных и климатических условий возделывания культуры и т. д. изменяется в широких пределах и всегда должна быть обеспечена запасом воды в почве.

Почвенные запасы влаги в основном создаются атмосферными осадками, часть которых проникает в почву. Поглощение осадков бесструктурными почвами составляет 25—30%, а структурными — 85% и даже больше от их годового количества  $A$ . Если через  $\mu$  обозначить долю осадков, поглощаемых почвой, то запас влаги в почве можно выразить через  $\mu A$ . При запасах воды в почве  $\mu A < R$  ее не хватает для получения ожидаемого урожая; при  $\mu A > R$  может оказаться избыток воды.

Так как в бесструктурных почвах возможности накопления запасов влаги меньше, чем в структурных, необходимо прежде всего стремиться к созданию структурного пахотного слоя почвы, обладающего к тому же лучшим водно-воздушным режимом. Однако при небольших атмосферных осадках все равно не может быть обеспечено достаточного запаса влаги.

Но общее количество атмосферных осадков в году еще не является исчерпывающим показателем увлажнения почвы. Особо важное значение имеет количество выпадающих осадков за вегетационный период и распределение их внутри этого периода, так как в различные фазы развития растений потребление влаги различно. Картофелем, например, в фазу прорастания и всходов потребляется 19%, в фазу роста ботвы — 32% и в фазу роста клубней — 49% влаги.

При несоответствии выпадающих осадков потребностям растений во влаге последние испытывают недостаток в воде, несмотря на большое в отдельных случаях общее количество осадков за год. Даже в районах избыточного увлажнения, как, например, в Ленинградской области, в среднем через год многие культуры (в особенности овощные) испытывают недостаток во влаге в наиболее ответственные для их развития весенние месяцы. В районе г. Батуми при осадках 2400 мм в год цитрусовые растения испытывают недостаток во влаге в апреле. В Московской области и на Крайнем Севере в засушливые годы и периоды растения также испытывают недостаток в воде.

Неравномерное распределение атмосферных осадков по территории СССР и во времени обуславливает и различный характер водно-воздушного режима почвы в различных районах. Общий недостаток влаги наблюдается в южных и юго-восточных районах, а избыток — в северо-западных и северных.

В районах с недостаточным общим увлажнением или с неблагоприятным распределением осадков во времени, а также на повышенных местах рельефа появляется необходимость в пополнении запасов влаги искусственным путем, т. е. орошением, а в районах с избыточным увлажнением и в переувлажненных низинах, наоборот, — необходимость отвода воды или осушения.

Считается, что систематическое орошение необходимо там, где при высокой испаряемости<sup>1</sup> годовое количество осадков меньше 250 мм. При большем количестве осадков орошение необходимо периодически, во время засух или для влаголюбивых растений.

В СССР систематическое орошение проводится на юге и юго-востоке, а периодическое — в ряде других районов. Так, в центральных областях (Курской и др.) практикуется орошение зерновых культур, а овощей — в Московской, Тульской, Горьковской и других областях, а также в Ленинградской и на Крайнем Севере.

Орошение проводится с целью регулирования водно-воздушного, теплового и питательного режима почвы для получения высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур.

Многочисленные опытные данные свидетельствуют о значительном увеличении урожая в результате орошения.

П. Д. Глебов отмечает, что урожай яровой пшеницы в Заволжье за ряд лет в среднем составлял 25,0 ц/га при орошении и 4,6 ц/га без орошения.

Урожай хлопка-сырца в 1940 г. по орошаемым районам СССР в среднем составлял 15,1 ц/га, а по неорошаемым площа-

<sup>1</sup> Испаряемостью называется максимально возможное суммарное испарение (испарение с почвы и транспирация растительности) в данных метеорологических условиях и при неограниченном количестве доступной для испарения влаги.

дям — 2,8 ц/га. В этих случаях в результате орошения урожай повысился более чем в пять раз.

### Виды орошения

Орошение производят как в вегетационный период (для обеспечения водного питания растений в текущем году и для повышения плодородия почвы), так и в невегетационный период, когда вода нужна больше для благоприятного прохождения почвенных процессов и меньше для растений будущего вегетационного периода.

В соответствии с задачей орошения различают следующие его виды:

1) увлажнительное — для обеспечения водного питания растений;

2) удобрительное — с целью внесения в почву питательных веществ;

3) теплительное — с целью согревания почвы;

4) почвоочищающее — с целью вымыва солей из почвы и уничтожения вредителей.

В свою очередь некоторые из этих видов орошения разделяются следующим образом: увлажнительное — на регулярно действующее (правильное) орошение и однократно действующее (паводковое и лиманное); удобрительное — на удобрительное речными водами и удобрительное городскими сточными водами; почвоочищающее — на промывочное засоленных почв и с целью уничтожения вредителей сельского хозяйства.

### Способы регулярно действующего орошения

Регулярно действующее (правильное) орошение осуществляется следующими тремя способами: 1) поверхностным или наземным, 2) дождеванием, 3) подпочвенным.

**Поверхностные способы полива.** Поверхностные способы полива являются наиболее распространенными. Оросительная вода при этих способах полива распределяется по территории: напуском по поверхности (по полосам), по бороздам и затоплением орошаемого участка.

**Полив напуском по полосам.** Вода тонким слоем 2—4 см двигается по уклону по полосам, огражденным невысокими валиками, и по мере движения впитывается в почву.

**Полив по бороздам.** В зависимости от почвенных условий и уклона местности полив производится по незатопляемым (инфилтрационным) или по затопляемым бороздам. При поливе по незатопляемым бороздам вода свободно течет небольшой струей по неглубоким бороздам и впитывается в почву через дно и борта борозд. При поливе по затопляемым бороздам вода

задерживается в нижнем конце глубоких и замкнутых (тупых) борозд и в течение сравнительно длительного интервала времени впитывается в почву.

**Полив затоплением.** В современных условиях полив затоплением применяется только для одной сельскохозяйственной культуры — риса.

Практикуется непрерывное затопление, когда рисовое поле покрыто водой непрерывно почти в течение всего вегетационного периода, и периодическое, когда затопление чередуется с периодами полного отсутствия воды. При этом длительность периодов затопления и отсутствия воды обычно одинакова и составляет 5—7 дней. Лишь при появлении всходов затопление длится 12—14 дней. Поливы с периодическими затоплениями имеют ряд преимуществ перед поливами с непрерывными затоплениями. В частности, сокращаются потери воды на испарение с поверхности затопленных полей, при просушках гибнут сорняки и личинки малярийного комара и т. д.

В СССР проводятся опыты возделывания специальных сортов риса обычными способами поверхностного орошения. Имеющиеся результаты доказывают, что в некоторых случаях можно отказаться от полива риса затоплением.

**Орошение дождеванием.** При орошении дождеванием создаются условия, близкие к орошению естественным дождем. Искусственный дождь создается специальными дождевальными аппаратами, выбрасывающими под напором струю в воздух, где она распыляется в капли той или иной крупности.

**Подпочвенное орошение.** При подпочвенном орошении поливная вода системой подземных водоводов (пористых труб, желобов, кротовин, фашин) вводится в глубь почвы, откуда она распространяется во всех направлениях гравитационным, капиллярным и пленочным движением. При переувлажнении почвы подземная оросительная система может работать как осушительная.

### **Достоинства и недостатки отдельных способов полива**

Применяемые в СССР способы полива обладают рядом достоинств и недостатков, основные из которых следующие (см. стр. 69).

Оценивая преимущества и недостатки различных способов полива, нужно отметить, что полив напуском по полосам является самым устарелым и допускается лишь в случае неприменимости других более совершенных способов полива. Полив непрерывным и даже периодическим затоплением обладает еще большими недостатками и поэтому он еще менее пригоден для социалистического сельского хозяйства.

Полив по бороздам свободен от многих недостатков, свойственных поливам напуском по полосам и затоплением. Он широко

Способ полива	Достоинства	Недостатки
Напуском по полосам	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обеспечивает равномерный водный режим почвы</li> <li>2. Допускает лучшую заделку семян в почве узкорядных культур (зерновых и трав)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разрушаются почвенные агрегаты и на поверхности образуется бесструктурная корка, затрудняющая аэрацию почвы</li> <li>2. Появляется опасность смыва почвенного слоя при поливе</li> </ol>
По бороздам	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Увлажнение происходит по капиллярам и структура почвы не разрушается</li> <li>2. Обеспечивает равномерный водно-воздушный режим почвы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Большая трудоемкость</li> <li>2. Опасность скопления солей в гребнях между бороздами (на засоленных почвах)</li> </ol>
Заотплением	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Гибнут сорняки (особенно просянка), легко заглушающие рис</li> <li>2. Обеспечивает слабую концентрацию почвенного раствора, требующуюся для риса</li> <li>3. Смягчаются суточные колебания температуры почвы, вредно сказывающиеся на рисе</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Разрушается структура почвы и нарушается воздушный режим ее</li> <li>2. Происходит заболачивание и засоление почвы</li> <li>3. Создаются очаги малярии</li> <li>4. Затрудняется механизация сельскохозяйственных работ</li> <li>5. Велики потери воды на испарение</li> </ol>
Дождеванием	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Увлажняется приземный слой воздуха</li> <li>2. Меньше чем при поверхностных поливах разрушается структура почвы</li> <li>3. Сводятся до минимума потери земли под поливной сетью</li> <li>4. Сводятся до минимума потери воды на испарение и фильтрацию</li> <li>5. Не требуется тщательная планировка поверхности орошаемого поля</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Большие единовременные затраты и эксплуатационные расходы</li> <li>2. Эффект работы дождевальных установок во многих случаях зависит от ветра</li> </ol>
Подпочвенный	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Не разрушается структура почвы</li> <li>2. Поливная вода используется экономно, так как испарение с поверхности мало</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Дрены часто засоряются и заиляются</li> <li>2. Происходит подсушка верхнего слоя почвы, что угнетает растение в начале его развития</li> <li>3. Велики единовременные затраты на устройство</li> </ol>

применяется на разных почвах, при разных уклонах орошаемой поверхности и для различных культур.

Однако все поверхностные способы полива, включая и полив по бороздам, во многих случаях приводят к переувлажнению почвы, при них развивается заболачивание и засоление почвы, результатом чего является выключение на время проведения мелиораций (осушения и промывки) таких земель из хозяйственного оборота.

Имеющиеся данные показывают, что подпочвенное орошение обеспечивает в некоторых районах (например, в Крыму) высокие урожаи (табл. 4.2, по Н. Д. Кременецкому). Из-за высоких первоначальных затрат оно применимо главным образом на небольших участках, например огородах.

Наиболее прогрессивным способом считается орошение дождеванием, применение которого возможно даже при близких грунтовых водах и на слабозасоленных почвах, где поверхностные поливы становятся опасными. При дождевании можно поливать часто и малыми нормами, тогда как при поверхностных поливах минимальная норма, при которой достигается необходимая равномерность полива, составляет 400—500 м<sup>3</sup>/га. Частыми поливами дождеванием удается поддерживать благоприятный для растений, мало изменяющийся режим влажности почвы и приземного слоя воздуха. Одной из причин, тормозивших до настоящего времени широкое внедрение этого способа орошения, был недостаток электроэнергии. Ввод в эксплуатацию Волжской имени В. И. Ленина, Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС, Каховской, Цимлянской, Мингечаурской и других гидроэлектростанций создает реальную основу развития орошения дождеванием в районах Поволжья, юга Украины, Дона, Куры и др.

### Нормы и режим поливов. Качество воды

**Нормы и режим поливов.** Количество воды, потребное на один гектар площади за один полив, носит название поливной нормы, а количество воды на один гектар за весь вегетационный период — оросительной нормы. Поливная и оросительная нормы выражаются в м<sup>3</sup>/га.

Таблица 4.2

Культура	Урожай при способах полива, ц/га		
	подпочвенное орошение	дождеванием	по бороздам
Хлопчатник . . . . .	30,3	27,0	20,3
Помидоры . . . . .	588	284	396
Огурцы . . . . .	631	552	422

Режим орошения, под которым понимается совокупность количества поливов, сроков поливов и поливных норм, зависит от многих факторов, наиболее важные из которых — почвенные и климатические условия, а также вид сельскохозяйственной культуры. Факторы обуславливающие режим орошения, разнообразны, и поэтому в разных условиях необходим свой режим поливов даже для одной и той же культуры. Сахарная свекла, например, на воронежском черноземе поливается иначе, чем на самаркандском сероземе и т. д.

Режим полива в каждом случае устанавливается путем расчета, основанного на данных опыта и теоретических соображений. Передовая практика орошения позволяет время от времени корректировать режим полива, добиваясь повышения эффекта оросительных мероприятий.

Первоначально определяются поливная и оросительная нормы нетто, т. е. то количество воды, которое необходимо непосредственно растению для нормального развития и роста. Впоследствии определяются соответственные нормы брутто, т. е. полное количество воды, которое должно быть предусмотрено в источнике и учитывающее не только полезную затрату воды, но и потери ее на испарение и фильтрацию как на орошаемых полях, так и в оросительной системе.

Потребность растений в воде вычисляется по расчетному урожаю и так называемому коэффициенту водопотребления, представляющему количество воды в  $m^3$ , потребное для создания центнера продукции урожая. Общая потребность в воде затем распределяется по декадам периода вегетации, соответственно расходу влаги растениями. Например, хлопчатник в Средней Азии в период до бутонизации расходует около  $300 m^3/га$  за декаду, в период бутонизации  $400—500 m^3/га$ , в период цветения  $800—900 m^3/га$  и в период созревания  $400 m^3/га$  за декаду.

Расчетные урожаи и примерные значения коэффициентов водопотребления для некоторых культур приводятся в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Культура	Расчетный урожай, ц/га	Коэффициент водопотребления, $m^3/ц$	Культура	Расчетный урожай, ц/га	Коэффициент водопотребления, $m^3/ц$	
Хлопчатник (Средняя Азия)	30	180—150	Многолетние травы (Заволжье)	50	90—70	
	50	110—90		100	55—40	
	100	70—55		200	40—30	
Зерновые (Заволжье, Украина)	30	110—80	Сахарная свекла	450	12—10	
	40	90—70		Картофель	400	11
	50	70—55				

Примерное распределение расхода влаги по декадам в процентах от расхода за весь вегетационный период для яровой пшеницы (черноземная зона) дается в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Декада с момента полива	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
%	1	2	3	6	7	12	16	20	18	12	3

Сопоставляя естественные запасы влаги в активном слое почвы с потребными объемами воды, определяют поливные и оросительные нормы нетто. В районах, где осадки вегетационного периода оказывают влияние на увлажнение почвы, вычисление норм ведется отдельно на среднезасушливый и сильно засушливый годы.

В пределах СССР поливные нормы обычно принимаются следующими:

При поверхностном орошении

для зерновых культур	600—750	м <sup>3</sup> /га
„ сахарной свеклы	600—800	„
„ многолетних трав (люцерны)	500—750	„
„ хлопчатника	500—950	„

При орошении дождеванием

для овощных культур в центральных областях	100—300	м <sup>3</sup> /га
„ овощных, пропашных и зерновых культур в южных областях	300—400	„

В зависимости от наличия рабочей силы и требований агротехники длительность одного полива колеблется от 5 до 12—15 дней.

За вегетационный период в разных условиях дают разное количество поливов, например:

для яровой пшеницы	— 2—5 поливов
„ сахарной свеклы	— 2—12 „
„ люцерны (на один укос)	— 2—3 полива

Оросительные нормы обычно находятся в следующих пределах:

для овощных культур в Ленинградской и смежных с ней областях	1000—2500	м <sup>3</sup> /га
для овощных культур в центральных областях	1500—3500	„
„ зерновых культур в южных областях	2700—3500	„
„ сахарной свеклы	3500—4000	„
„ хлопчатника	6500—7000	„
„ трав в южных областях	6700—7400	„

Самые большие нормы отвечают культуре риса:

Приморский край	7 000—10 000	м <sup>3</sup> /га
плавни р. Кубани	14 000—28 000	„
республики Средней Азии	22 000—58 000	„



В приведенные поливные и оросительные нормы входит как используемая растениями вода, так и потери на просачивание в грунт за пределы зоны, в которой почвенная влага доступна для транспирации растениями, и на испарение с поверхности почвы. При обычных способах орошения эти потери составляют примерно 10%. При поливе же риса затоплением потери огромны, что объясняется большим расходом воды на полное насыщение почвы (до водоупора или до уровня грунтовых вод), образование слоя воды на поверхности, потери на испарение с поверхности воды и отток в глубину и через ограждающие дамбы.

**Качество воды.** Употребляемая для орошения вода должна обладать необходимым качеством как в отношении содержания твердых частиц (наносов), так и растворенных солей.

Частицы ила до крупности 0,15 мм являются полезными для орошения.

При общем содержании растворенных солей (соды, поваренной и глауберовой соли и др.) от 1,0 до 1,5 г/л вода является безвредной для растений. При содержании растворенных солей в пределах 1,5—5,0 г/л вода пригодна для орошения с некоторыми ограничениями, а при содержании солей свыше 5,0—6,0 г/л вода практически непригодна.

При содержании твердых частиц и растворенных солей больше указанного вода требует предварительного отстоя и разбавления для уменьшения концентрации наносов и солей.

### Поливной график

После установления поливного режима отдельных культур составляется поливной график для орошаемой площади в целом, в соответствии с которым и производятся поливы. График строят в координатах: время (ось абсцисс) — расход (ось ординат).

Пусть орошаемая площадь  $\omega$  га засеяна культурами  $A, B, C$ , занимающими соответственно доли  $\alpha, \beta, \gamma$  от всей площади  $\omega$ . Если принять, что  $m_{a_1}, m_{a_2}$  — поливные нормы,  $t_{a_1}, t_{a_2}$  — длительность в сутках первого, второго и т. д. поливов и  $T_{a_1}, T_a$  — длительность в часах первого, второго и т. д. поливов, то, например, для культуры  $A$  получим следующие величины поливных расходов для этой культуры:

первого полива

$$Q_{a_1} = \frac{m_{a_1} \alpha \omega}{t_{a_1} T_{a_1} 3600} \text{ м}^3/\text{сек} = \frac{m_{a_1} \alpha \omega}{3,6 T_{a_1} t_{a_1}} \text{ л/сек},$$

второго полива

$$Q_{a_2} = \frac{m_{a_2} \alpha \omega}{3,6 T_{a_2} t_{a_2}} \text{ л/сек} \text{ и т. д.} \quad (1.2)$$

Аналогичным путем вычисляются расходы и для поливов остальных культур  $B, C$  и т. д.

Если расход отнести к единице площади (1 га), получим так называемый оросительный гидромодуль. Для культуры А, например, оросительный гидромодуль первого полива будет равен

$$q_{a_1} = \frac{m_{a_1} \alpha}{3,6 T_{a_1} t_{a_1}} \text{ л/сек на 1 га и т. д.} \quad (2.2)$$

Расходы по отдельным культурам наносятся на график в пределах принятых сроков полива. При совпадении времени полива разных культур ординаты графика складываются. В результате такого построения получается так называемый неуккомплектованный

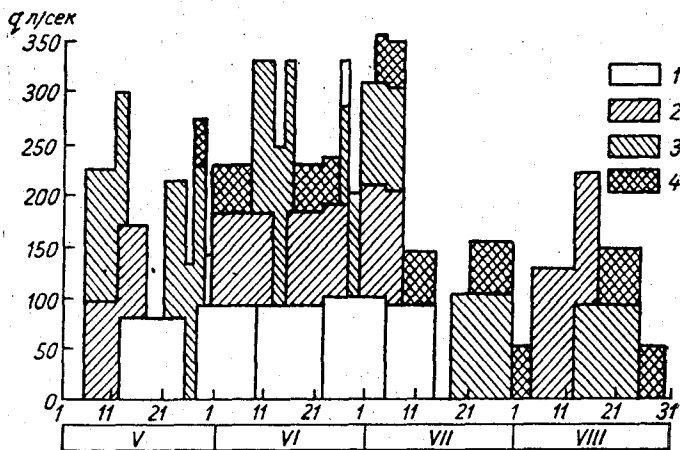


Рис. 3.2. Неуккомплектованный график поливов.  
1 — яровая пшеница, 2 — озимая пшеница, 3 — многолетние травы, 4 — кукуруза.

ный график поливов всей площади. Пример неуккомплектованного графика показан на рис. 3.2. Из этого графика видно, что суммарный расход по времени резко изменяется от 50 до 350 л/сек, а в некоторые дни поливы вовсе не нужны.

Таким образом, строгое соблюдение установленного режима привело бы к большим эксплуатационным неудобствам при поливах и к излишним затратам на устройство оросительных каналов и сооружений, так как пришлось бы их рассчитывать на очень большие расходы воды. Для устранения указанных недостатков график уплотняют, что достигается главным образом за счет сокращения сроков полива с целью по возможности избежать совпадения по времени полива отдельных культур, однако не изменяя существенно средние даты поливов.

Укомплектование предыдущего неуккомплектованного графика привело к тому, что максимальная ордината понизилась до

255 л/сек, минимальная поднялась до 130 л/сек, а сам график стал достаточно равномерным (рис. 4.2).

### Оросительная система и коэффициент полезного действия системы

**Оросительная система.** Вода на поля орошения подается и распределяется с помощью оросительной системы.

Независимо от способов полива оросительная система состоит из следующих основных элементов:

1. Головное сооружение, обеспечивающее забор воды из источника в магистральный канал.

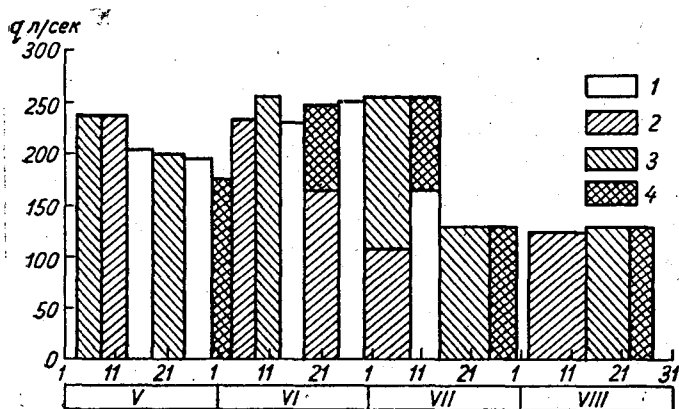


Рис. 4.2. Укомплектованный график поливов.

1 — яровая пшеница, 2 — озимая пшеница, 3 — многолетние травы, 4 — кукуруза.

2. Магистральный канал, транспортирующий воду от источника в глубь орошаемой территории.

3. Межхозяйственные распределительные каналы, транспортирующие воду от магистрального канала до отдельных орошаемых хозяйств (колхозов, совхозов).

4. Хозяйственные распределительные каналы, транспортирующие воду от межхозяйственных распределителей или непосредственно от магистрального канала до орошаемых мелких хозяйств.

5. Участковые распределительные каналы, распределяющие воду по территории данного орошаемого хозяйства.

При сложном рельефе и на крупных оросительных системах иногда устраиваются групповые распределители, питающие водой несколько участковых распределителей.

Перечисленные элементы входят в состав постоянной сети. При поверхностных способах полива эта сеть должна командовать над орошаемой территорией. При орошении дождеванием командование не обязательно.

Системой постоянных оросительных каналов орошаемая территория разбивается на поливные участки размером: в районах сеяния зерновых культур — 40—60 га и больше, хлопка — 20—40 га и больше, а на землях с большим количеством древесных насаждений — 10—20 га.

Внутри поливных участков разбивается временная сеть, состоящая из оросителей, выводных и вспомогательных (распределительных) борозд и поливных борозд, или полос. Временная сеть устраивается ежегодно одновременно с посевом или сразу после него, сохраняется на все время поливов и ликвидируется при уборке урожая или при последующей обработке почвы.

При орошении дождеванием временная сеть в зависимости от типа дождевальных установок частично или полностью отпадает. Взамен ее появляется система трубопроводов.

В старой системе орошения, существовавшей до издания постановления Совета Министров СССР от 17 августа 1950 г. «О переходе на новую систему орошения в целях более полного использования орошаемых земель и улучшения механизации сельскохозяйственных работ», имелась более густая сеть постоянных каналов, что препятствовало внедрению механизации работ и приводило к потере части земли (3—5%), остающейся неиспользованной в 4—5-метровой полосе постоянных каналов.

К оросительной системе следует отнести также и водосбросную сеть, надобность в которой возникает в связи с необходимостью отвода с орошаемой территории избыточных вод, например фильтрационных, от дождей, при опорожнении каналов после поливов или при непредвиденных сбросах. Водосбросная сеть располагается на пониженных местах.

**Коэффициент полезного действия системы.** При транспортировании воды от источника до орошаемых полей часть ее теряется на фильтрацию в грунт через дно и откосы каналов, на утечку при эксплуатации оросительной сети и на испарение с водной поверхности системы.

Потери на испарение обычно невелики и не превышают 4—7% потерь на фильтрацию. Поэтому ими в большинстве случаев пренебрегают.

Потери на фильтрацию зависят от водопроницаемости грунтов, размеров поперечных сечений, длины каналов и способов борьбы с фильтрацией. В практике борьба с потерями ведется главным образом путем покрытия дна и откосов каналов специальной одеждой из бетона или глины, нефтееванием, засолонцеванием и кольматированием русел каналов и др.

Отношение количества воды, поданной непосредственно на поля  $W_{нт}$ , к количеству воды, взятой из источника  $W_{бр}$ , называется коэффициентом полезного действия ирригационной системы ( $W_{бр}$  отличается от  $W_{нт}$  на потери  $W_{пот}$  в оросительной системе).

Расчет потерь и расчет поперечных сечений каналов производится последовательно, начиная от орошаемых полей, где расход задан условиями полива (по укрупненному графику), и кончая головным участком магистрального канала, где расход равен

$$Q_{бр} = Q_{нт} + \sum Q_{пот}. \quad (3.2)$$

Здесь  $Q_{нт}$  — суммарный расход нетто, подаваемый на поля,  $\sum Q_{пот}$  — суммарный расход потерь во всех каналах системы.

По выражению (3.2) может быть определен расход в голове любого канала или в любом сечении его. Тогда суммарные потери берутся во всех каналах ниже данного расчетного сечения.

Потери на фильтрацию обычно определяются по формулам А. Н. Костякова [3].

В. А. Розин [4] приводит следующие ориентировочные значения коэффициентов полезного действия оросительных систем (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Характеристика оросительных каналов системы	Коэффициент полезного действия при площади нетто системы		
	от 50 000 до 25 000 га	от 25 000 до 10 000 га	от 10 000 до 1000 га
Обычные земляные каналы в нормальном состоянии . . . . .	0,55—0,60	0,60—0,65	0,65—0,70
Земляные каналы в нормальном состоянии с применением простейших мероприятий по уменьшению фильтрации . . . . .	0,60—0,65	0,65—0,75	0,70—0,75
Бетонировка магистрального канала и крупных распределителей и простейшие мероприятия на остальных каналах . . . . .	0,70—0,80	0,75—0,85	0,80—0,90

Применение дождевания несколько повышает коэффициент полезного действия системы, поскольку, с одной стороны, уменьшаются поливные нормы, а с другой — уменьшается протяжение поливной сети.

### Лиманное орошение

В некоторых районах страны, главным образом на юго-востоке Европейской территории СССР и в Северном Казахстане, широко применяется так называемое лиманное орошение. Оно заключается во временном задержании весенних талых или паводочных вод на обвалованной горизонтальной или слегка наклонной местности. Задержанная таким образом вода затем используется как для орошения ниже расположенных земельных участков, так и на самой затопленной территории (лимане), которая по проходе

воды распахивается и засеивается. Задерживается вода и на уже засеянных площадях или на естественных кормовых угодьях — сенокосах и пастбищах.

В настоящее время производятся опыты по применению лиманного орошения на землях, где весеннего стока почти не бывает, например на Черных землях (Северный Кавказ). В таких случаях орошение осуществляется за счет воды, получаемой в результате проведения обводнительных мероприятий. Лиманное орошение на Черных землях, в частности, предполагается осуществить на базе Терско-Кумской обводнительно-оросительной системы.

### **Обводнение**

Обводнение представляет собой водохозяйственные мероприятия по созданию на данной территории водных источников, дополняющих ресурсы местных поверхностных вод и предназначенных для водоснабжения животноводческих хозяйств, земледелия, населения, промышленных предприятий и т. д.

Обводнение может осуществляться за счет подземных вод путем устройства колодцев, за счет задержания в прудах и копанях снеговых, дождевых и ключевых вод, а также за счет подвода воды из других, богатых водными ресурсами, речных бассейнов по специальным обводнительным каналам. Из названных способов обводнения наиболее эффективными, особенно в полупустынных и пустынных районах, являются обводнительные каналы, вода в которые поступает самотеком или посредством насосных станций из рек или водохранилищ.

Надежность обводнительных систем повышается, если проведены мероприятия по максимальному задержанию местного поверхностного стока, накоплению грунтовых вод и по уменьшению потерь воды в каналах и водохранилищах. Размещение обводнительных сооружений по пастбищной территории сообразуют с системой пастбищ и водопоя, а на полевых угодьях эти сооружения приурочивают к полевым станам, заправочным пунктам и т. п.

Поскольку основная задача обводнения — водоснабжение, оно не обеспечивает достаточно полного использования обводняемых земель. Вместе с тем обводнение может при дополнительном увеличении подачи воды легко перерасти в орошение и повысить освоенность земельного фонда.

## **§ 3. ЭНЕРГЕТИКА**

### **Потребители электроэнергии**

Электрическая энергия прочно вошла во все отрасли нашего народного хозяйства и быт.

К настоящему времени проведена электрификация предприя-

тий большинства отраслей промышленности — заменены паровые и механические приводы электроприводами, электрифицированы металлургические, химические и другие процессы производства, электрифицируются железнодорожный транспорт, сельскохозяйственные работы и т. д. В сельское хозяйство внедряется электромеханизация и создается материальная база для широкого применения в ряде районов страны орошения дождеванием. Поэтому одним из крупных элементов сельскохозяйственного электропотребления в недалеком будущем станет электропахота и машинное орошение.

Вследствие огромных эксплуатационных и экономических преимуществ электрифицированных железных дорог перед обычными намечается значительное расширение сети электрифицированных дорог, а отсюда и большое увеличение электропотребления со стороны этой отрасли народного хозяйства. Указанные преимущества заключаются в резком сокращении потребления топлива железными дорогами, значительно увеличивается пропускная и провозная способность дороги, следствием чего являются сокращения подвижного состава (электровозов и вагонов), обслуживающего персонала и снижение себестоимости транспортных операций.

При проектировании как гидравлической, так и тепловой электростанции, работающей изолированно или обычно входящей в энергосистему, устанавливаются размеры и режим ожидаемого электропотребления. К основным группам энергопотребителей относятся промышленность, коммунальное хозяйство и бытовые нужды, железнодорожный транспорт, сельское хозяйство и др.

### Нормы электропотребления

Размеры ожидаемого электропотребления для различных видов потребителей устанавливаются по удельным нормам.

Удельные нормы для промышленных потребителей обычно относятся к единице выпускаемой продукции: тонне, кубометру, метру и т. д. Однако для предприятий, выпускающих большой и разнообразный ассортимент продукции, например для машиностроительных и химических заводов, пищевкусовых предприятий и т. д., удобнее относить удельную норму потребления энергии на 1000 руб. стоимости валового выпуска продукции.

В коммунальном хозяйстве принимают сводную норму потребления энергии на одного жителя. Для электрифицированных железных дорог норма принимается на 1 ткм или на 1 км пути. В сельском хозяйстве применяется норма потребления электроэнергии, отнесенная на колхозный двор, на гектар обрабатываемой земли, на голову животного и т. д.

**Промышленное электропотребление.** Отдельными производ-

ствами электроэнергии потребляется в значительном количестве — до 100 *квт-ч/т* готовой продукции (некоторые виды химической, топливная, горнорудная промышленность, машиностроение). От 100 до 1000 *квт-ч/т* потребляют так называемые среднеэлектроемкие производства (чугунное, электросталь, нефть). Свыше 1000 *квт-ч/т* потребляют электроемкие производства (некоторые виды химической, бумажной промышленности и др.). Среди последних встречаются некоторые производства, потребляющие свыше 18 000 *квт-ч/т* (производство металлического алюминия, электролиз магния) и даже 50 000 *квт-ч/т* (производство никеля).

В соответствии с этими нормами значение энергетической составляющей в себестоимости различных видов промышленной продукции находится в пределах 15—55% себестоимости готового продукта.

**Коммунально-бытовое электропотребление.** Нормы электропотребления на коммунальные и бытовые нужды определяются благоустройством населенных пунктов и городов, численностью населения и т. п.

В коммунально-бытовое потребление включаются расходы электроэнергии на освещение жилых домов, общественных зданий и улиц, бытовые приборы, радио- и телевизионную аппаратуру, водопровод и канализацию, городской транспорт и т. д. В современных условиях на коммунально-бытовые нужды расходуется электроэнергия в некрупных городах до 200 *квт-ч* на одного жителя в год, а крупных — до 600 *квт-ч*. За счет перевода отопления и приготовления пищи на электроэнергию, а также более широкого охвата быта электрификацией планируется резкое увеличение расходования электроэнергии на коммунально-бытовые нужды — к 1970 г. до 550 *квт-ч* на одного жителя в год и к 1980 г. до 1700 *квт-ч*.

**Электропотребление электрифицированного железнодорожного транспорта.** Подробные расчеты нагрузки от электрифицированных железных дорог ведутся по удельным нормам, выраженным в ватт-часах на 1 *ткм*.

При предварительных расчетах обычно принимаются укрупненные показатели расхода электроэнергии на 1 *км* пути в год. В зависимости от грузонапряженности, профиля и назначения дороги расход энергии оценивается в 400—500 тыс. *квт-ч* при современном и 500—750 тыс. *квт-ч* на 1 *км* в год при перспективном уровне развития народного хозяйства.

**Сельскохозяйственное электропотребление.** Электрификация сельских районов идет по двум направлениям: по линии внедрения энергии в коммунальное хозяйство и быт и по линии электрификации процессов сельскохозяйственных работ.

Коммунально-бытовое сельскохозяйственное электропотребление меньше городского вследствие частичного или полного от-



сутствия ряда статей расхода, в том числе на внутренний транспорт, водопровод, канализацию и др.

На конференции по электрификации сельского хозяйства Украинской ССР (1945 г.) была рекомендована норма годового потребления электроэнергии на коммунально-бытовые нужды в колхозах, равная 55 *квт-ч* на одного жителя (для 1960—1965 гг.). В эту норму входит расходование электроэнергии на освещение жилых домов и общественных зданий, бытовые нагревательные приборы, радио, кино, хлебопечение, бани и пр.

Нормы электропотребления в животноводстве составляют: на корову 515 *квт-ч*, свиноматку 1360 *квт-ч*, овцу 3,3 *квт-ч* и т. д.

Применяются также укрупненные нормы электропотребления в сельском хозяйстве на один колхозный двор, которые зависят от специализации хозяйства.

Удельные расходы энергии на электропахоту составляют от 35 до 85 *квт-ч* на 1 *га* и на культивацию от 25 до 55 *квт-ч*.

Расходы электроэнергии на орошение 1 *га* земли в зависимости от способов полива и высоты подъема воды приведены в табл. 8.2 (*квт-ч*, по материалам упомянутой конференции).

Таблица 8.2

Хозяйство (зона)	Способ полива					
	поверхностный			дождеванием		
	Высота подъема воды, м					
	1	50	100	1	50	100
Огородные						
лесостепной части . . . . .	11	570	1140	12	850	1450
центральной части . . . . .	13	660	1320	14	1000	1700
южной части . . . . .	17	850	1700	18	1275	2200
Сады . . . . .	17—18	875— 900	1750— 1800			

Характерные показатели по ирригации с использованием энергии волжских ГЭС в *квт-ч* на 1 *га* равны:

по Сталинградской и Астраханской областям . . . . .	1700—1750
по Саратовской области . . . . .	1100—1150
по центрально-черноземным областям . . . . .	1200—1250

При определении суммарного электропотребления необходимо учитывать потери в электросетях и потребность в энергии на собственные нужды электростанций. Потери в зависимости от разветвленности электросетей и преобладания промышленных или районных электростанций составляют от 5 до 15% к отпуску электроэнергии в сеть.

Расход энергии на собственные нужды для чисто гидроэнергетических систем составляет около 1% выработки энергии, а для энергосистем тепловых электростанций — от 6 до 10%.

### Режим потребления электрической энергии

При заданном развитии народного хозяйства и известных нормах можно определить потребность в энергии для отдельных групп потребителей и в целом для исследуемого района или города. Однако одним количеством используемой энергии характеризовать потребителя невозможно, так как потребление меняется во времени.

Каждой отрасли народного хозяйства свойственны свои особенности режима электропотребления и в зависимости от доли участия того или иного вида нагрузки режим суммарного электропотребления будет отражать особенности режима преобладающей нагрузки.

Потребление энергии меняется внутри суток, недели, месяца и года. Суточные изменения нагрузки наиболее значительны и в основном вызываются различным потреблением энергии в разное время суток на осветительные и хозяйственно-бытовые нужды населения, сменностью производственных процессов и т. п. Промышленная нагрузка с непрерывным производственным циклом (по преимуществу электроемкие производства) отличается наибольшей выравненностью, а промышленная нагрузка с односменным производством — наименьшей выравненностью. На выравнивание режима промышленного электропотребления наряду с увеличением числа смен большое влияние оказывает автоматизация и общая электрификация производства. Поэтому широкое внедрение автоматизации и электрификации в промышленность создает предпосылки к значительному выравниванию режима ее перспективного электропотребления. Повышает равномерность суточного режима коммунально-бытового потребления энергии массовая электрификация бытовых процессов.

Недельные колебания нагрузки обуславливаются наличием и распределением по отдельным предприятиям выходных дней, в которые уменьшается потребление энергии по сравнению с рабочими днями.

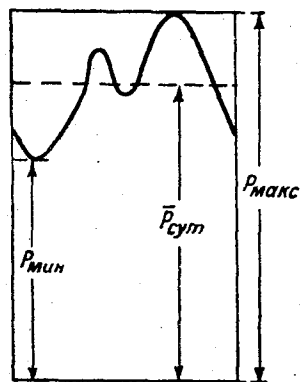
Изменения нагрузки внутри месяца и года происходят как под влиянием естественных причин (изменения продолжительности дня), так и под влиянием производственных причин (присоединения новых и расширения действующих предприятий), а также по производственно-технологическим причинам: сезонности некоторых производств, в частности сельскохозяйственных и торфяной промышленности, периодом отпусков, остановками на ремонт и т. д. Для тех энергосистем, в которых удельный вес сезонных потребителей небольшой, характерным является закономерное

снижение нагрузки в летние месяцы, вызываемое уменьшением потребления энергии на осветительные нужды, при общей тенденции повышения нагрузки в течение года вследствие присоединения новых предприятий и других причин. Наличие в системе крупных сезонных потребителей энергии может известным образом нейтрализовать указанное снижение нагрузки летних месяцев.

### Графики электрической нагрузки

Основной характеристикой режима электропотребления являются суточные графики нагрузки по району или энергосистеме.

Суточные графики нагрузки обычно строятся по средним величинам в интервале 1 часа. Однако при решении ряда энергетических задач, например выбора установленной мощности электростанций и др., кроме среднечасовых нагрузок, необходимо также знать и мгновенные максимальные нагрузки. Для отдельных видов потребителей, в частности для электрифицированного транспорта, отношение абсолютного максимума к среднечасовому может достигать значительных величин — 1,5 и даже 3,0 для пятнадцатиминутного пика. В целом же для системы, как правило, отношение мгновенного максимума к среднечасовому сравнительно мало.



Типичный суточный график электрической нагрузки энергосистемы для зимнего дня приведен на рис. 5.2.

Основными показателями графика, характеризующими внутрисуточные изменения энергопотребления, являются:

а) коэффициент внутрисуточной равномерности (коэффициент полноты суточного графика), равный отношению средней суточной нагрузки к максимальной среднечасовой,

$$\gamma = \frac{\bar{P}_{\text{сут}}}{P_{\text{макс}}}; \quad (4.2)$$

б) коэффициент минимума, равный отношению минимальной среднесуточной нагрузки к максимальной,

$$\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\text{макс}}}. \quad (5.2)$$

В энергетических расчетах коэффициент  $\gamma$  используют для характеристики равномерности и других графиков нагрузки или

части их, например внутрисуточной, внутринедельной, внутримесячной и т. д. Символ  $\gamma \left( \gamma = \frac{P_{сут}}{P} \right)$  в таких случаях имеет соответствующий индекс.

Численные значения коэффициентов  $\gamma$  и  $\beta$  находятся в зависимости от состава потребителей. Коэффициент суточного мини-

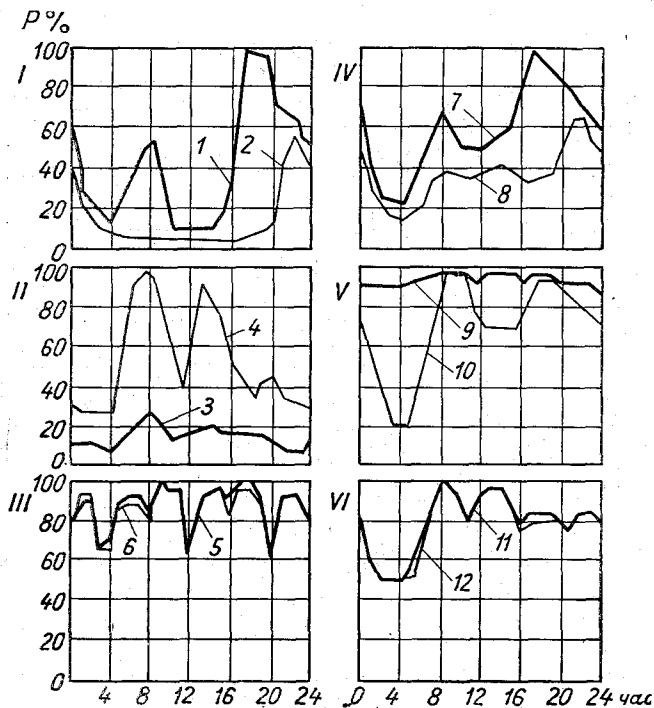


Рис. 6.2. Типовые суточные графики нагрузки.

*I* — Освещение квартирное, *II* — Сельское хозяйство, *III* — Угледобыча, *IV* — Суммарная городская коммунально-бытовая нагрузка, *V* — Электрифицированные железные дороги, *VI* — Машиностроение.  
 1 — зима  $\gamma = 0,42$ , 2 — лето  $\gamma = 0,26$ , 3 — зима, 4 — лето, 5 — зима  $\gamma = 0,88$ , 6 — лето  $\gamma = 0,90$ , 7 — зима  $\gamma = 0,57$ , 8 — лето  $\gamma = 0,35$ , 9 — грузовое движение, 10 — пригородное движение, 11 — зима  $\gamma = 0,79$ , 12 — лето  $\gamma = 0,78$ .

мум  $\beta$  может изменяться от нуля (при отсутствии ночных смен на производстве и ночной осветительной нагрузке) до единицы (при непрерывных производствах и очень малой коммунально-бытовой нагрузке). Коэффициент  $\gamma$  зависит от сменности и равномерности промышленной нагрузки, удельного веса осветительной и бытовой нагрузки, сочетания пиков и провалов различных частных графиков и т. д. Значение  $\gamma$  находится в пределах  $\beta < \gamma < 1$ .

По проектным данным, коэффициент  $\gamma$  для суммарной коммунально-бытовой нагрузки городов в зимнее время составляет 0,45—0,57, а в летнее — 0,25—0,40. Тот же коэффициент для электрремких производств, например, равен 0,96.

Типовые суточные графики нагрузки (в процентах от максимальной) для некоторых групп потребителей (частные графики), являющиеся исходными для построения графиков системы, показаны на рис. 6.2.

Изменения электропотребления внутри недели, характеризующиеся коэффициентом  $\gamma_{нед}$ , у отдельных потребителей бывают значительными. В целом же по системе, как это можно видеть на рис. 7.2, они обычно невелики.

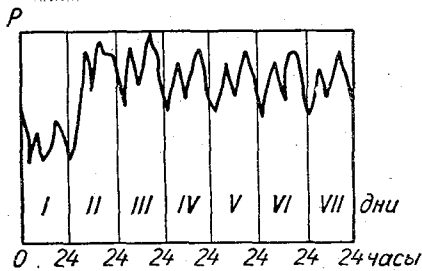


Рис. 7.2. Недельный график нагрузок энергосистемы.

Коэффициент  $\gamma_{мес}$  в промышленности может колебаться от 0,86 для предприятия, останавливаемого на выходной день, до

1,0 — для автоматизированного непрерывного производства. Для системы этот коэффициент обычно равен 0,88—0,93.

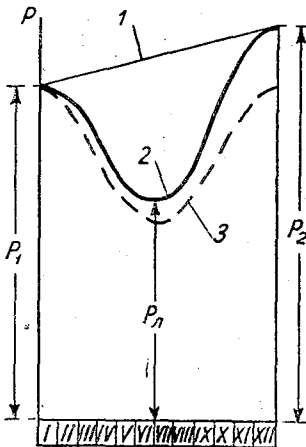


Рис. 8.2. Годовой график максимумов нагрузки.

1 — линия прироста, 2 — динамическая кривая, 3 — статическая кривая.

Важной характеристикой режима электропотребления также является годовой график максимумов нагрузки района или системы. Типичный годовой график максимумов нагрузки показан на рис. 8.2, на котором нанесено две линии. Первая из них характеризует статическое состояние энергосистемы, т. е. не учитывает годового прироста нагрузки. Эта линия имеет вспомогательное значение и строится для облегчения анализа режима составляющих нагрузки и характеристики ее части. Вторая линия отражает динамику роста нагрузки системы.

Эта динамика учитывается коэффициентом  $\delta$ , равным отношению годового максимума  $P_2$  к максимуму в начале года  $P_1$ .

Коэффициент прироста нагрузки  $\delta$  для энергосистем СССР, отражающий общий подъем народного хозяйства, представляет

собой устойчивую величину и находится в пределах 1,10—1,20 и выше.

Величина летнего наименьшего максимума для большинства наших энергосистем составляет  $P_{л}=0,70-0,90P_1$ , а глубина летнего провала  $P_{пр}=P_1-P_{л}$ , при часто встречающемся приросте нагрузки 15%, равна 10—25% годового максимума.

Для выполнения водноэнергетических расчетов (см. гл. 9), помимо рассмотренных выше, необходим график средних месячных нагрузок (мощностей). По этому графику проверяется годовой баланс электрической энергии, который является исходным при расчете суточных графиков нагрузки и годового графика максимумов.

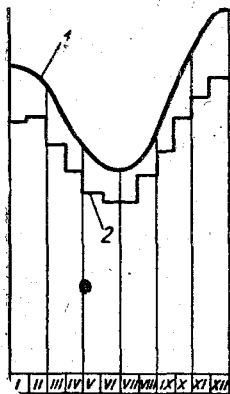


Рис. 9.2. Максимальные (1) и средние месячные (2) нагрузки.

Средние месячные нагрузки  $P_{мес}$  определяются по месячным максимумам  $P$  и коэффициентам равномерности нагрузки суточной  $\gamma$  и месячной  $\gamma_{мес}$ , пользуясь выражением

$$\bar{P}_{мес} = \gamma \gamma_{мес} P_{макс}. \quad (6.2)$$

Примерные соотношения между максимальными и средними месячными нагрузками видны на рис. 9.2.

#### Пересчет графиков электрической нагрузки в графики расходов воды электростанции

В водохозяйственных и водноэнергетических расчетах иногда, например при составлении суммарного графика водопотребления при комплексном использовании или в специальных целях, появляется необходимость представить график электрических нагрузок в виде графика расходов воды, используемых на ГЭС. Такой график можно построить только для определенных условий, а именно для конкретной ГЭС (или ряда каскадно расположенных ГЭС) с известными напорами и закономерностью изменения их в течение года, коэффициентами полезного действия турбин и генераторов и для той части графика нагрузки энергосистемы, которая отводится для покрытия рассматриваемой ГЭС (каскада). Указанный пересчет ведется по тем же интервалам времени, по которым представлен график нагрузок, отражающий годовой баланс энергии. Средняя величина расхода в пределах расчетного интервала, например месяца, может быть найдена исходя из формулы мощности (см. гл. 9)

$$Q = \frac{N}{KH}, \quad (7.2)$$

где  $Q$  — расход ГЭС в  $м^3/сек$ ;  $N$  — мощность ГЭС в  $квт$ ;  $H$  — напор ГЭС в метрах;  $K$  — коэффициент мощности.

Все величины — средние за расчетный интервал.

#### § 4. ВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ

Требования водного транспорта (судоходства и лесосплава) сводятся к тому, чтобы на водных путях в навигационный период поддерживались необходимые для плавания габариты: глубины, ширины и радиусы закруглений. Габариты пути определяются местными условиями и габаритами судов и лесосплавных единиц.

##### Мероприятия по поддержанию судоходных и лесосплавных условий

Основным препятствием для водного транспорта являются перекаты, глубина на которых в период межени уменьшается. Еще большим препятствием служат порожистые участки рек со значительными поверхностными уклонами и скоростями течения, где судоходство иногда даже в высокую воду не может осуществляться. Поэтому из-за порогов судоходная трасса на реке иногда разъединена на части, как это было на Днепре до постройки ГЭС имени В. И. Ленина. Изменить такое положение можно созданием подпора, т. е. шлюзованием, или значительным увеличением меженных расходов воды путем регулирования стока выше расположенными водохранилищами, а также проведением ряда других мероприятий:

а) устройства обстановки, в задачу которой входит обеспечение безопасности плавания, что достигается расстановкой соответствующих знаков и сигнализацией;

б) руслоочистения — очистки фарватера или всего русла и берегов от отдельных предметов: камней, карчей, затонувшей древесины, якорей, судов и т. д.;

в) дноуглубления или землечерпания — углубления судового хода удалением грунта и устройством прорези;

г) выправления русла путем постройки выправительных сооружений для сужения и изменения направления потока с целью придать желаемую форму и глубину судовому ходу, защиты берегов от размыва и т. п.

Первое из перечисленных мероприятий является принадлежностью всех водных путей. Применение остальных мероприятий в том или ином сочетании зависит от состояния водного пути, габаритов судов, грузооборота и т. д. Три последних мероприятия объединяются общим названием «путевые работы».

При совместном применении различных мероприятий на одном водотоке или участке одно из мероприятий может быть решающим. Так, например, на Волге, ниже впадения Шексны,

и на ряде других водотоков долгое время основным методом улучшения судоходных условий было дноуглубление.

Путем руслоочищения и дноуглубления достигается увеличение глубин без заметного изменения скоростей течения воды. При выправлении, однако, возможны случаи образования в месте сжатия потока больших скоростей, затрудняющих судоходство по направлению против течения (так называемое взводное судоходство).

Регулирование стока увеличивает расходы воды и скорости течения в межень и уменьшает расходы и скорости в паводок.

Шлюзование приводит к значительному уменьшению скоростей течения, особенно на участках верхних бьефов, ближайших к подпорным сооружениям.

В связи с преграждением потока сооружениями на шлюзованных реках пропускная способность ограничивается временем шлюзования, в то время как на нешлюзованных реках пропускная способность практически не ограничена.

Пропуск судов из одного бьефа в другой производится через шлюзы. Часто для транспорта леса используются те же судоходные шлюзы, а иногда устраиваются специальные приспособления — лотки, плотходы и др.

С созданием водохранилищ условия плавания изменяются и приближаются к озерным. Ввиду этого на больших водохранилищах должны использоваться суда, приспособленные для озерного плавания, так как речные суда не обладают необходимой прочностью и не смогут безопасно плавать по водохранилищу в условиях большого волнения при шторме.

К качеству пути более высокие требования предъявляются со стороны судоходства, так как лесосплав, особенно при сплаве россыпью (модем), может происходить при относительно неблагоприятных условиях пути.

Судовой ход трассируется по линии наибольших глубин. Направление хода, его границы, отдельные препятствия и минимальные глубины обозначаются береговыми и плавучими знаками, совокупность которых и составляет обстановку водных путей.

По глубокому, широкому и с малой кривизной судовому ходу могут плавать большие караваны судов, имеющие значительные осадки. По мелкому, неширокому с большой кривизной судовому ходу могут плавать только небольшие суда с малыми осадками. Грузооборот на таких водных путях ограничен.

### Перекаты и их режим

Русла рек, протекающих в аллювиальных отложениях, представляют собой чередование перекатов с плесовыми лощинами, образованными в понижениях дна. Перекатами являются нанос-



ные образования, которые пересекают фарватер и вызывают подпор уровней реки.

Возникновение и режим перекатов связываются с различной формирующей деятельностью речного потока в половодье и в межень.

В половодье при затопленной пойме траектории течений обычно не совпадают с траекториями меженного потока. Из-за этого в поворотах меженного русла, где чаще всего и образуются перекаты, площади живого сечения в половодье (вместе с поймой) бывают больше, чем площади живого сечения на

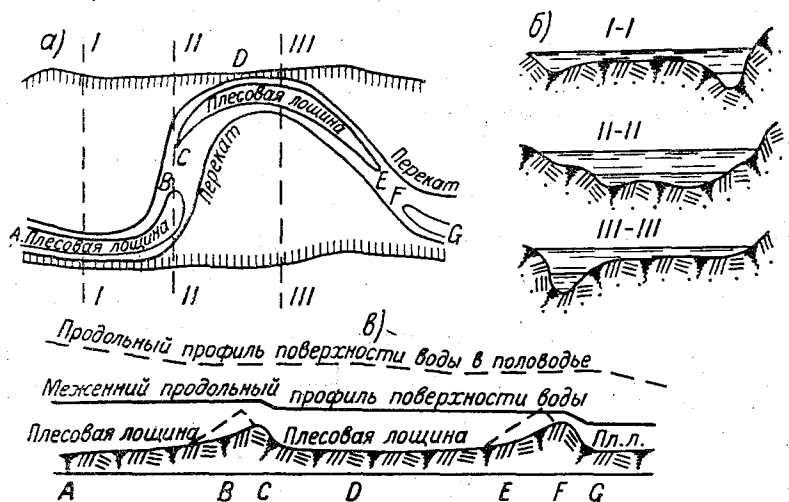


Рис. 10.2. План (а), поперечные разрезы (б) и продольный профиль реки в межень и в половодье (в).

плесовых ложинах (рис. 10.2). Поэтому во время половодья уклоны и скорости течения на перекатах обычно меньше, чем в соседних плесовых ложинах. В межень происходит перераспределение поверхностных уклонов и скоростей, и на перекатах скорости становятся больше скоростей течения на плесах.

Изменение вдоль реки уклонов и скоростей течения вызывает нарушение равновесия между транспортирующей способностью потока и его насыщенностью наносами, и в области пониженных скоростей происходит отложение наносов, а в области повышенных скоростей течения — размыв. Поэтому в половодье, как правило, на перекатах происходят намывы и отметки гребня перекатов повышаются, а на плесовых ложинах происходят размывы. В межень процесс намыва переката сменяется размывом его и занесением плесовых участков реки. Однако меженные воды обычно не вносят больших изменений в рельеф дна, а ограничиваются лишь переформированием некоторых его элементов.

Образованию и росту перекатов содействуют также циркуляционные течения, возникающие на поворотах русла, при переходе стрежня течения от одного берега к другому, а также уширения русла, особенно при наличии какого-либо осередка, обтекание которого приводит к некоторому подпору.

В ряде случаев направления траекторий течений в половодье и в межень совпадают, тогда перекаты не подвергаются каким-либо заметным переформированиям. На некоторых пере-

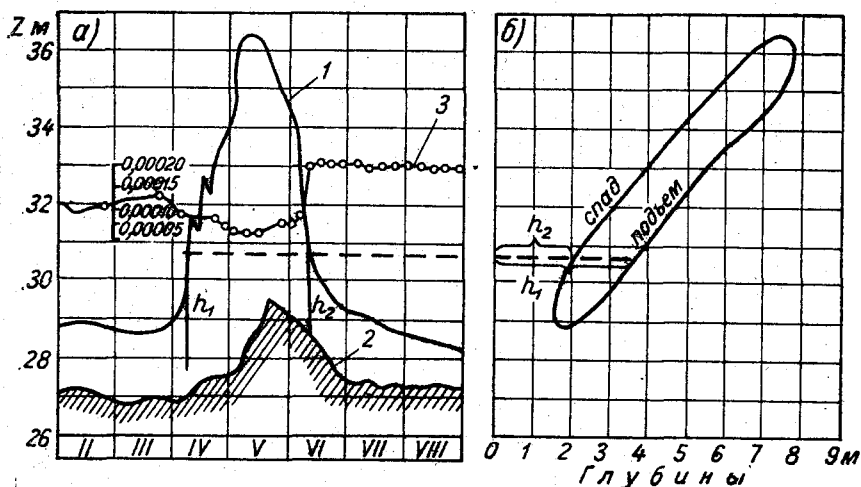


Рис. 11.2. Изменение глубин ( $h$ ) в зависимости от горизонтов воды на деформируемом перекате.

1 — горизонты, 2 — дно переката, 3 — уклон.

катах даже наблюдаются размывы дна при повышении горизонта.

Интенсивность процессов переформирования русла, имеющих периодический ежегодно повторяющийся характер, зависит от гидрологического и гидравлического режима реки, геологического строения ее ложа, от насыщенности потока наносами за счет эрозии на водосборе и т. д. и представляет сложную картину.

### Зависимость глубины от горизонта воды. Градиент глубины

На перекатах, подверженных деформации, отметка гребня обычно изменяется с изменением горизонта воды. При подъеме горизонта происходит повышение гребня переката, при понижении горизонта — понижение. Повышение гребня переката за половодье иногда достигает 3 м и более. Высота нарастания пе-

реката тем больше, чем выше половодье. Наивысшая отметка гребня переката не совпадает с высоким горизонтом воды и несколько сдвинута в сторону спада. Иначе говоря, намыв переката несколько отстает по времени от нарастания горизонтов (рис. 11.2 а).

При изменениях расходов и горизонтов воды глубины на перекатах также изменяются. Разность отметок горизонта воды  $Z_y$  и гребня переката  $Z_n$  дает глубину на перекате  $h = Z_y - Z_n$ . Откладывая на оси ординат отметки горизонтов воды, а на оси абсцисс глубины, получим зависимость  $h = f(Z_y)$ , которая имеет петлеобразный вид и показывает, что при одном и том же горизонте глубины на подъеме больше, а на спаде меньше (рис. 11.2 б). Такое положение является следствием меньшей интенсивности размыва при спаде горизонтов по сравнению с намывом при подъеме.

На перекатах, слабо или вовсе не подверженных деформации, зависимости глубин от отметок горизонтов получаются однозначные.

Величины тангенсов углов наклона линий в зависимости  $h = f(Z_y)$  к осям координат являются показателями направленности и интенсивности происходящих на перекате деформаций.

На подъеме горизонтов за интервал времени  $\Delta t = t_2 - t_1$  будем иметь (рис. 12.2):

$$\Delta Z = Z_{y_2} - Z_{y_1} \text{ — приращение отметки горизонта,}$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 \text{ — приращение глубины,}$$

$$\Delta Z_n = Z_{n_2} - Z_{n_1} \text{ — приращение отметки гребня переката.}$$

$\Delta Z_n$  будет положительно ( $Z'_{n_2} - Z_{n_1}$ ) при намыве переката, отрицательно ( $Z'''_{n_2} - Z_{n_1}$ ) при размыве и  $\Delta Z_n = 0$ , когда перекат устойчив ( $Z''_{n_2} - Z_{n_1}$ ).

Нетрудно видеть, что отношение  $\alpha$  приращения глубины  $\Delta h$  к приращению горизонта  $\Delta Z$ , которое можно назвать «градиентом глубины», будет:

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta Z} = \frac{\Delta Z - \Delta Z_n}{\Delta Z} < 1 \text{ — при намыве переката,}$$

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta Z} = \frac{\Delta Z + \Delta Z_n}{\Delta Z} > 1 \text{ — при размыве переката,}$$

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta Z} = \frac{\Delta Z}{\Delta Z} = 1 \text{ — перекат устойчив.}$$

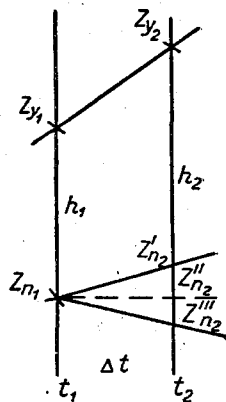


Рис. 12.2. Схема изменения глубин на перекате на подъеме половодья.

На спаде горизонтов в первом случае  $\alpha > 1$  и во втором  $\alpha < 1$ . Так как при водохозяйственном использовании по преимуществу приходится иметь дело с увеличением глубин за счет повышения горизонтов при регулировании стока или при подпоре сооружениями, интерес представляют отношения  $\alpha$ , выведенные для подъема горизонтов, и именно то из них, которое

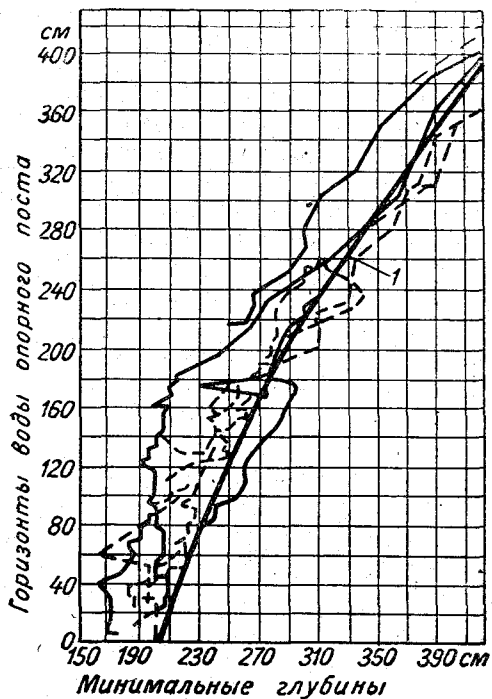


Рис. 13.2. Зависимость минимальных глубин от горизонтов воды и кривая дифференцированных (1) гарантийных глубин.

отвечает намыву переката. Необходимость преимущественного учета последнего оправдывается тем обстоятельством, что в подавляющем числе случаев, как уже отмечено, имеет место намыв переката при подъеме горизонтов, а, кроме того, это создает некоторый запас в расчетах.

Многочисленные наблюдения и анализ материалов наблюдений, проведенные на ряде рек с деформируемым дном — Волге, Дону, Оке, Каме и др. (Б. В. Поляков, Л. И. Кустов, Г. И. Шамов и др.), показали, что в зависимости от интенсивности намыва градиент глубины колеблется в широком диапазоне, снижаясь до 0,5 и ниже на очень плохих перекатах. В сред-

нем  $\alpha=0,8$ , а для некоторых рек среднее значение  $\alpha=0,6$  (р. Обь), т. е. повышению горизонта, например, на 10 см отвечает увеличение глубины на 8 или 6 см.

В практике проектирования градиент глубины устанавливается на основе анализа данных непосредственных наблюдений, а при отсутствии таковых — по аналогии с другими реками, находящимися в близких условиях.

Обычно построение зависимости  $h=f(Z_y)$  производится не по отдельным перекатам, а по целым участкам реки, характеризующимся однообразным гидрологическим режимом и судоходными условиями. При этом горизонты берутся по ближайшему к участку водомерному посту, принимаемому за опорный, отражающему уровень режим реки в целом по участку и длительно действующему, а глубины — наименьшие. Если на участке имеется небольшое число очень тяжелых перекатов, на которых путем проведения различных мероприятий предполагается повысить глубины до величин, отвечающих остальным перекатам, при построении зависимости  $h=f(Z_y)$  такие перекааты исключаются. Зависимости  $h=f(Z_y)$ , как правило, строятся для периода спада половодья по возможности за последние годы наблюдений. Иногда строятся зависимости минимальных глубин от расходов  $h=f(Q)$ .

На рис. 13.2 показана зависимость минимальных глубин на участке от горизонтов опорного водомерного поста за ряд лет. По отдельным годам эти зависимости весьма неустойчивы, что может быть объяснено различной формирующей деятельностью потока в разные годы. Большое влияние на устойчивость зависимости  $h=f(Z_y)$  оказывает также дноуглубление и проведение других видов работ.

По построенным за ряд лет зависимостям  $h=f(Z_y)$  строят расчетную как среднюю или как одну из огибающих. Какую из указанных кривых принимать за расчетную, зависит от того, намечается ли проводить какие-либо дополнительные работы (дноуглубление и др.) по увеличению глубин, и от ожидаемого эффекта от этих работ. Если такие дополнительные работы намечаются, то расчетная кривая проводится ближе к наибольшим глубинам.

### Гарантийные глубины. Проектный горизонт

Обеспечиваемая на отдельном участке или на всем протяжении реки минимальная глубина судового хода называется минимальной гарантийной глубиной. Минимальная гарантийная глубина судового хода в данном пункте реки отсчитывается от отметки низкого меженного горизонта, называемого проектным.

Отметка проектного горизонта находится по многолетней

кривой продолжительности средних суточных горизонтов за период навигации при определенной обеспеченности. Обеспеченность назначается в зависимости от значения реки или ее участка как транспортного пути и заключена в пределах [9]: а) для магистралей — 95—99%, б) для путей местного значения — 93—96%, в) для подъездных путей — 90—96%.

Если проектный горизонт соответствует, например, обеспеченности 95%, это значит, что в среднем за многолетний период 5% дней в течение навигации горизонт стоял ниже проектного, а 95% — выше проектного.

Когда на всем протяжении реки или ее участках габариты судового хода остаются одинаковыми, проектный горизонт на всех водомерных постах должен иметь одну и ту же обеспеченность. Гарантийные габариты судового хода ежегодно устанавливаются министерствами речного флота союзных республик.

В современных условиях на судоходных реках поддерживаются так называемые дифференцированные гарантийные глубины, величины которых определяются высотой стояния горизонта воды на опорном водомерном посту (предложение Л. И. Кустова).

В качестве кривой дифференцированных гарантийных глубин используется рассмотренная выше расчетная кривая (см. рис. 13.2). Применение этой кривой означает, что если горизонт воды на опорном водомерном посту выше проектного, должна поддерживаться и большая глубина судового хода по сравнению с минимальной гарантией. Повышенная глубина судового хода используется для более значительной загрузки судов, т. е. для повышения провозной способности реки или ее отдельных участков.

### **Увеличение гарантийных глубин подпором горизонтов**

Для оценки влияния подпора горизонтов на увеличение судоходных глубин необходимо в верхнем бьефе гидротехнических сооружений строить две кривые свободной поверхности: в бытовых условиях и при подпоре.

Обе кривые строятся по расходу, отвечающему проектному горизонту, и при минимальной навигационной отметке горизонта у сооружения (при подпоре), отвечающей времени прохождения по реке указанного расхода. При наличии выше по течению водохранилища, регулирующего сток, кривые свободной поверхности должны строиться по зарегулированным расходам воды. Разница между отметками свободных поверхностей при подпоре и бытовой даст приращение горизонта за счет подпора на любом перекате верхнего бьефа, от которого по соответствующему градиенту можно перейти к приращению глубины, и далее к самой глубине после постройки сооружения.

Пусть на интересующем нас перекате приращение отметки горизонта составляет  $\Delta Z$ , бытовая минимальная гарантийная глубина  $h_6$  и градиент принимается равным  $\alpha$ . Тогда минимальная гарантийная глубина при подпоре  $h_{\Pi}$  определится по выражению

$$h_{\Pi} = h_6 + \Delta h = h_6 + \alpha \Delta Z.$$

Если полученное увеличение минимальной гарантийной глубины за счет подпора не удовлетворяет требованиям водного транспорта, то в случае возможности следует ограничить сработку водохранилища в навигационный период более высокой отметкой минимального горизонта.

### Увеличение гарантийных глубин регулированием стока

Увеличение судоходных глубин в нижних бьефах гидротехнических сооружений за счет регулирования стока достигается повышением навигационного расхода по сравнению с расходом  $Q_6$ , при котором в бытовых условиях обеспечивается минимальная гарантийная глубина  $h_6$ , отсчитываемая от проектного горизонта  $Z_{y6}$  на опорном водомерном посту.

Если намечается увеличить глубину  $h_6$  на  $\Delta h$ , это означает, что надо повысить горизонт на  $\Delta Z = \frac{\Delta h}{\alpha}$ , чем и определится повышение расхода на величину  $\Delta Q$ . Таким образом, можно написать:

$$h_{\Pi} = h_6 + \Delta h, \quad Z_{y\Pi} = Z_{y6} + \Delta Z, \quad Q_{\Pi} = Q_6 + \Delta Q,$$

где (кроме указанных выше)  $h_{\Pi}$  — проектная минимальная гарантийная глубина,  $Z_{y\Pi}$  — проектный навигационный горизонт после осуществления регулирования стока,  $Q_{\Pi}$  — проектный навигационный расход, определяемый по кривой расходов  $Z_y = f(Q)$  при горизонте  $Z_{y\Pi}$ .

Если водохранилище, помимо сезонного или многолетнего регулирования, осуществляет также суточное регулирование стока, например при энергетическом использовании водотока, то отметка  $Z_{y\Pi}$  является функцией не только среднего суточного расхода попуска в нижний бьеф (расход воды через турбины ГЭС в сумме с расходами на шлюзование и фильтрацию), но и минимального расхода в часы провала суточного графика нагрузки и длительности этого провала. Допустимые величины минимального расхода воды и длительность работы с таким расходом устанавливаются специальными расчетами при учете не только интересов водного транспорта (глубина на перекатах и на пороге нижней головы шлюза, отметки горизонтов у причальных сооружений и т. д.), но и других отраслей хозяйства — водоснабжения, ирригации и др.

Вопрос о минимальных навигационных горизонтах водохранилища, которыми определяются проектные минимальные гарантийные глубины в верхнем бьефе, и о размерах навигационных зарегулированных расходов воды для обеспечения тех или иных глубин в нижнем бьефе гидротехнических сооружений должен решаться на основе технико-экономических сравнений различных вариантов. В этих сравнениях подлежит учету как изменение эффекта для водного транспорта и остальных отраслей водного хозяйства при увеличении или уменьшении навигационного расхода, так и возможность получения такого же эффекта путем осуществления других мероприятий (дноуглубления и др.).

### **Особенности требований лесосплава. Учет аккумулялирующей способности русла**

При лесосплаве, осуществляемом на судоходных реках, обычно предусмотренные проектом мероприятия по улучшению условий судоходства полностью удовлетворяют также и требованиям лесосплава. При проектировании же мероприятий по улучшению условий сплава леса на малых несудоходных реках необходимо учитывать специфичность режима регулирования стока создаваемыми на них водохранилищами. Дело в том, что из-за высокой стоимости, сравнительно небольших объемов стока и пр. невозможно осуществить непрерывное регулирование и длительно поддерживать постоянные попуски воды на ниже лежащие участки реки. Поэтому попуски производятся эпизодически по мере накопления стока в водохранилищах (подробно см. ниже). Эффективность подобных водохранилищ резко снижается, так как с таким режимом их работы связана непроизводительная затрата воды на заполнение русла от низкого уровня, предшествующего началу пропусков, до проектного, обеспечивающего необходимую для лесосплава глубину реки. Потеря воды тем больше, чем дальше от плотины находятся затруднительные для лесосплава места (перекаты) и чем больше аккумулялирующая способность русла. Объем воды, затрачиваемый на заполнение русла, накапливается в водохранилище сверх полезного и выпускается из него с необходимой заблаговременностью большими расходами по сравнению с расчетными, соответствующими заданным глубинам при установившемся режиме.

Для определения объема воды, расходоуемого на повышение уровня в реке до проектного, необходимо иметь морфометрические характеристики русла. Последние устанавливаются по имеющимся топографическим материалам и промерам русла или по материалам специально поставленных для этой цели съемок. Имея поперечные сечения русла в ряде характерных мест и определяя площади сечений при низком и проектном го-



ризонтах по разности их, получим площади заполнения  $\Delta\omega_1$ ,  $\Delta\omega_2$ , ... При расстоянии между сечениями  $l_1, l_2, \dots$  общий объем аккумуляции воды в русле найдем по выражению

$$W = \left( \frac{\Delta\omega_1 + \Delta\omega_2}{2} \right) l_1 + \left( \frac{\Delta\omega_2 + \Delta\omega_3}{2} \right) l_2 + \dots + \left( \frac{\Delta\omega_{n-1} + \Delta\omega_n}{2} \right) l_{n-1}. \quad (8.2)$$

### Расход воды на шлюзование

Расход воды на шлюзование зависит от размеров сливной призмы камеры шлюза, количества шлюзований в сутки и может быть определен по выражению

$$q = \frac{BLhn}{86400}, \quad (9.2)$$

где  $B$  — ширина камеры в метрах;  $L$  — длина камеры в метрах;  $h$  — высота сливной призмы, равная разности горизонтов при наполненной и слитой призме в метрах;  $n$  — количество шлюзований в сутки.

Выражение (9.2) дает максимальное значение расхода на шлюзование, так как не учитывает встречных шлюзований, при которых не требуется специального наполнения камеры шлюза. Путем улучшения организации движения судов, направленной к увеличению количества встречных шлюзований, можно уменьшить расход воды на шлюзование. В последние годы на канале имени Москвы этот расход уменьшен на  $1/3$  по сравнению с максимальной величиной его.

Для одного и того же напора, преодолеваемого сооружением, расход воды на шлюзование при однокамерном шлюзе больше, чем при многокамерном (здесь имеются в виду одинаковые размеры камер по ширине и длине). Расход воды на шлюзование обратно пропорционален количеству камер шлюза.

### Увеличение гарантийных глубин дноуглублением

Выше был рассмотрен вопрос об увеличении судоходных глубин подпором горизонтов и повышением навигационных расходов воды путем регулирования стока. При этом предполагалось, что интенсивность дноуглубительных и других работ на будущее остается той же, что и в бытовых условиях, т. е. до постройки проектируемого сооружения и водохранилища. Между тем (в связи с образованием подпора) на значительном протяжении верхних бьефов отпадает необходимость продолжать

дноуглубительные работы и освободившиеся снаряды можно было бы использовать для дополнительного увеличения глубин в хвостовой части водохранилищ и в нижних бьефах сооружений или для увеличения судоходных глубин на тех реках, где в бытовых условиях дноуглубление было развито слабо или вообще не велось и обеспечивались небольшие глубины.

Путем построения и анализа рассмотренных выше связей  $h=f(Z_y)$  для перекатов, лимитирующих судоходство, определяют при заданной осадке судов и лесосплавных единиц, какие из перекатов и в какой мере нуждаются в проведении дноуглубительных и других путевых работ в различные периоды навигации.

На реках с весенним половодьем деформации русел в большинстве случаев бывают настолько значительными, что судо-

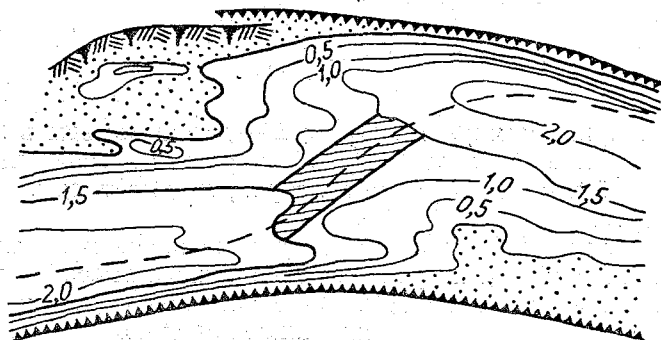


Рис. 14.2. Направление прорези на перекате.

ходные прорези (рис. 14.2), созданные в предшествующую навигацию, обычно полностью заносятся. В меженный период прорези обычно также заносятся, хотя и с меньшей интенсивностью по сравнению с периодом половодья. Поэтому приходится вести дноуглубление для возобновления прорези и поддержания необходимых габаритов ее в течение всей навигации. Первый вид работ называют «восстановительным» дноуглублением, второй «ремонтным», или «повторным». В отдельных случаях, когда судовой ход переносится на новую трассу, с чем связано выполнение большого объема земляных работ, проводится «капитальное» дноуглубление.

Восстановительное дноуглубление производится на спаде половодья с целью подготовить перекаат к межени. Начинается оно при таких горизонтах в реке, когда рамы снарядов достают заданное дно прорезей, а заканчивается при горизонтах, близких к проектному. Повторное дноуглубление производится в период после окончания восстановительного дноуглубления до конца навигации.

Опытные данные показывают (рис. 15.2), что повышение дна прорези наблюдается сразу же после ее выполнения. Процесс повышения дна протекает довольно равномерно, поэтому скорость потери глубины при неизменном горизонте может приниматься постоянной. К. И. Россинский и И. А. Кузьмин на основе данных по ряду рек показали, что между потерей глубины и расходом (рис. 16.2) существует (в первом приближении) пря-

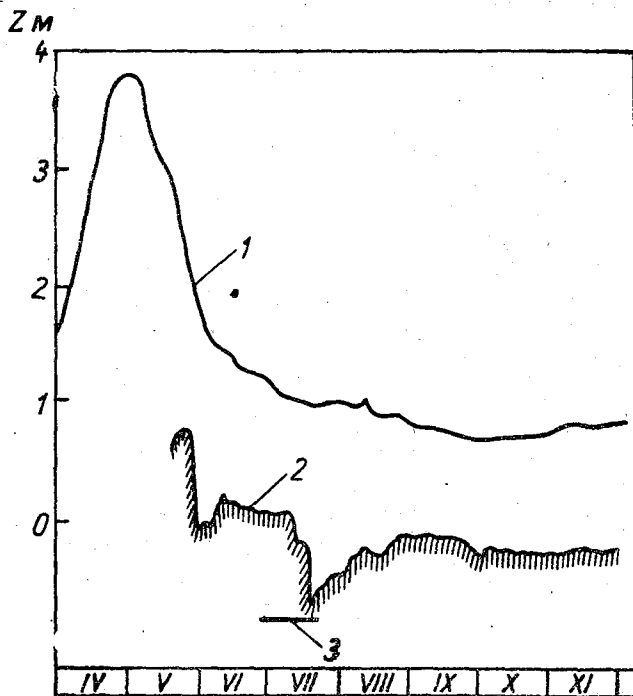


Рис. 15.2. Графики горизонтов воды и отметок дна на перекате при дноуглублении.

1 — горизонты воды, 2 — линия дна, 3 — период дноуглубления.

молинейная связь для отдельных участков рек с неизменным по длине режимом. Эти связи позволяют учитывать изменения заносимости прорезей при изменении гидрологического режима реки [8].

Дноуглубление производится не одновременно на всех перекатах участка реки, а последовательно. В результате этого, когда на одном перекате только что достигнута проектная глубина, на других перекатах прорези либо еще не выполнены, либо уже занесены и необходимо повторное углубление. Следствием такого положения является то, что для достижения проектного

дна в целом по участку нужно в глубине черпания давать запас на заносимость с тем, чтобы к началу следующего повторного углубления иметь отметку дна прорези не выше проектной.

Как показывает практика дноуглубления, наибольший вес в общем объеме черпания занимает объем запаса на заносимость, так как он располагается ниже профильного, т. е. основного объема, обусловленного заданной глубиной, и вынимается повторно, и глубина выемки объема заносимости обычно зна-

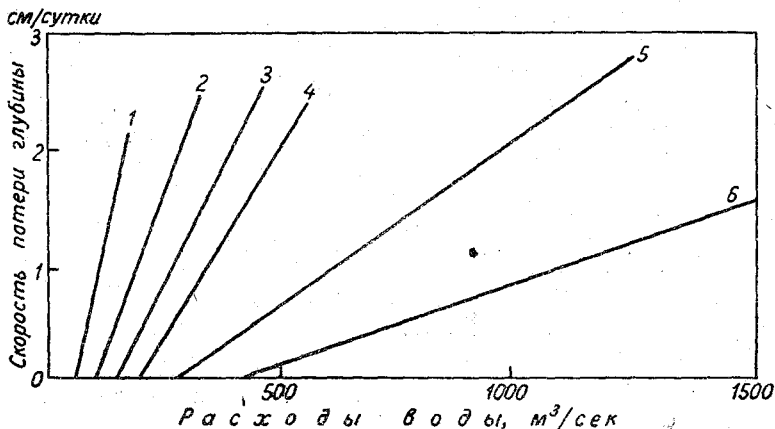


Рис. 16.2. Зависимость скорости обмеления судоходных прорезей от расходов воды для равнинных рек разных размеров. Значения среднемноголетнего расхода воды.

1 — 350 м³/сек, 2 — 600 м³/сек, 3 — 800 м³/сек, 4 — 1200 м³/сек, 5 — 1700 м³/сек, 6 — 3400 м³/сек.

чительно превышает глубину выемки профильного объема (например, при углублении на 0,2—0,3 м дается фактический запас на заносимость 0,5—0,7 м).

При наличии топографических съемок перекаатов объем землечерпания определяется подсчетом по поперечникам, на которые наносятся профили прорези по заданной глубине, ширине по дну и крутизне откосов, пользуясь формулой

$$W = \left( \frac{f_1 + f_2}{2} \right) l_1 + \left( \frac{f_2 + f_3}{2} \right) l_2 + \dots + \left( \frac{f_{n-1} + f_n}{2} \right) l_{n-1}, \quad (10.2)$$

где  $f_1, f_2 \dots f_n$  — площади поперечных сечений прорези,  $l_1, l_2 \dots l_{n-1}$  — расстояния между сечениями.

## 5. РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Постройка гидротехнических сооружений, перегораживающих русло, на крупных реках вызывает нарушения условий сложившегося рыбного хозяйства. Эти нарушения в основном сводятся к преграждению пути прохода рыб к нерестилищам. Так, Цимлянская плотина отрезала нерестилища донской сельди и других ценных пород рыб. Плотина Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС преградила путь к местам нереста белуги, белорыбицы и частично осетра, севрюги, сельди и др.

Попытки сохранить проход рыб к местам нереста путем устройства в сооружениях рыбоходов пока не дали желательных результатов, поэтому поставлен вопрос о ликвидации нарушений иными средствами.

Для устранения снижения продуктивности рыбного хозяйства в настоящее время проводится искусственное разведение в водохранилищах карповых, сиговых, лососевых, осетровых и других ценных пород рыб. При этом сравнительно недорогие мероприятия позволяют не только компенсировать снижение продуктивности, но даже превзойти ее.

В связи с приспособлением водохранилищ для разведения и лова рыбы возникают дополнительные требования к режиму их работы. В частности, не допускаются резкие колебания уровней водохранилищ, особенно в пределах того диапазона отметок, при которых значительно меняются площади зеркала. В зимнее время не должны допускаться снижения уровней, которые бы могли вызвать промерзание мелководных участков водохранилищ и тем самым вызвать гибель находящейся там рыбы.

В отношении зарегулированных расходов в нижних бьефах самых нижних по течению сооружений ставятся требования о сохранении в течение непродолжительного периода (около 1 месяца) больших расходов воды, обеспечивающих высокие уровни, для возможности нереста рыб на ниже лежащих участках рек. Это требование рыбного хозяйства привело к необходимости давать ежегодно в течение одного месяца специальные попуски из водохранилища Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС в размере  $25\,000\text{ м}^3/\text{сек}$ . Подобные же требования должны быть учтены и при проектировании сооружений на других реках.

При проектировании и эксплуатации режим сработки водохранилищ (сроки и длительность) и режим специальных пусков воды в нижний бьеф должны согласовываться с рыбохозяйственными организациями.

## § 6. БЛАГОУСТРОЙСТВО НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ

Наряду с удовлетворением требований рассмотренных выше отраслей водного хозяйства водохранилища могут решать и другие задачи, в частности благоустройства населенных мест.

Благоустройство может выразиться, во-первых, в ликвидации очагов малярии путем затопления заболоченных пространств и понижений рельефа в поймах рек, периодически затапливаемых полыми водами, и, во-вторых, в создании самого водного зеркала, которое можно использовать для различных целей. Например, подъем уровня при образовании водохранилища может приблизить воду к населенным пунктам, что облегчит водозабор, сделает возможным строительство пристаней и баз водного спорта вблизи этих населенных пунктов и т. д. На берегах водохранилищ возможно создание пляжей, дачных поселков, домов отдыха, санаториев и т. п. При надлежащей организации охраны санитарного состояния водохранилищ — недопущении загрязнения их сбросом неочищенных городских и промышленных сточных вод — они будут содействовать оздоровлению местности и общему благоустройству населенных мест.

В интересах благоприятного воздействия водохранилища на оздоровление местности следует не допускать сработки его в теплую часть года до горизонтов, при которых могут появиться мелководья, так как это приведет к возникновению очагов малярии.

## § 7. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВОДООТДАЧИ

### Понятие обеспеченности

Сток естественных водотоков, используемых для удовлетворения потребности в воде отдельных отраслей народного хозяйства, как известно, подвержен колебаниям. С помощью водохранилищ эти колебания смягчаются, и чем больше емкость водохранилища по отношению к регулируемому стоку, тем выше степень выравнивания. Однако даже при достаточно больших емкостях водохранилищ не удается полностью устранить колебания, и в стоке зарегулированного водотока, хотя и значительно реже, чем в естественных условиях, будут иметь место отклонения от требуемого режима. Только ценой очень больших затрат на постройку весьма крупных водохранилищ возможно было бы добиться выравнивания стока, близкого к полному. Но с народнохозяйственной точки зрения подобные мероприятия не оправдываются. Поэтому все водохозяйственные установки проектируются и строятся в расчете на какую-то заранее установленную степень надежности (гарантии) их работы по заданному режиму.

В случае когда рассматриваются водохранилища, повышающие минимальный сток реки, нарушение принятого режима связано с понижением зарегулированного расхода по сравнению с гарантированной величиной. В других случаях, когда речь идет о величине максимального расхода, принятого для расчета

пропускной способности сбросных отверстий сооружений, нарушение режима связывается с превышением расчетного расхода. Указанные нарушения гарантированного режима называются перебоями.

В современной практике водохозяйственного проектирования надежность работы установки по гарантированному режиму оценивается обеспеченностью (в процентах или в долях единицы). В применении к конкретным водохозяйственным задачам понятие обеспеченности имеет двоякое значение. Под обеспеченностью можно понимать как отношение общей продолжительности работы установки без нарушения гарантированного режима к полной продолжительности ее работы, так и отношение числа лет с ненарушенным режимом к общему числу лет работы без учета длительности и характера отклонений от гарантированного режима. В сущности, только второе значение этого понятия строго отвечает обеспеченности. Именно оно и принимается в гидрологии при вероятностной характеристике фазово-однородных величин; первое же значение понятия обеспеченности характеризует среднюю продолжительность за исследуемый период.

Обеспеченность по числу бесперебойных лет понимается в том смысле, что, например, обеспеченности 95% отвечает работа установки в 95 годах из 100 при ненарушенном режиме, а в 5 годах — работа с ограничениями, т. е. с перебоями. При этом и 95 и 5 лет из 100 представляют средние числа лет из большого числа столетий. Это означает, что в одно столетие возможно меньшее число бесперебойных или перебойных лет работы установки, а в другое столетие, наоборот, — большое число бесперебойных или перебойных лет.

Обеспеченность ненарушенного режима по числу бесперебойных лет по отношению к обеспеченности по времени (продолжительности) всегда меньше, так как в некоторые перебойные годы длительность самого перебоя может оказаться незначительной.

Указанное соотношение между обеспеченностями по числу бесперебойных лет и времени подтверждается рядом практических данных и его следует иметь в виду при водохозяйственном проектировании.

#### **Обеспеченность водоотдачи разным отраслям народного хозяйства**

Величина расчетной обеспеченности находится в тесной зависимости от последствий, т. е. от размера ущербов, вызываемых перебоями, и размеров затрат, связанных с устранением этих перебоев путем повышения обеспеченности работы на гарантированном режиме.

Указанные последствия могут иметь двоякую форму. В одном случае перебои могут вызвать последствия катастрофиче-

ского порядка, например разрушение плотины из-за значительного превышения расчетного максимального расхода. В другом случае, когда имеются в виду низкие расходы, более обычным является уменьшение выпуска продукции обслуживаемых водохозяйственной установкой энергетических и промышленных предприятий, сельского хозяйства, водного транспорта (уменьшение глубин) и т. д. При резком падении расхода в период перебоа возможны также последствия катастрофического порядка, приводящие к полной остановке предприятий из-за недостатка воды и гидравлической энергии, невозможности осуществления грузовых и пассажирских перевозок водным транспортом и т. д.

Различные отрасли народного хозяйства по-разному реагируют на перебоа. Имеющиеся хотя еще и недостаточные данные свидетельствуют, например, о том, что при водоснабжении промышленных предприятий и, в частности металлургического комбината, при прямоточной системе водоснабжения уменьшение подачи воды в пределах 15—20% гарантированного расхода не вызывает еще снижения производительности, а при оборотной системе уменьшение расхода уже на 5—10% ухудшает условия работы предприятия, но также не сказывается на производительности его основных цехов. Дальнейшее уменьшение гарантированного расхода вначале снижает производительность, а затем сказывается более резко — приводит к остановке отдельных агрегатов или целых производств [11].

Примерно также обстоит дело и при водоснабжении тепловых электростанций.

При неполном удовлетворении в воде сельскохозяйственного орошения приходится прибегать (в зависимости от местных условий) или к уменьшению поливных норм, или к сокращению поливных площадей. В том и другом случаях перебоа приводят к уменьшению продукции сельского хозяйства.

Прямым следствием перебоев при использовании гидравлической энергии является соответственное уменьшение мощности и выработки энергии ГЭС.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [11] приводят результаты некоторых работ, посвященных экономической оценке перебоев. Из указанных работ следует, что ущербы от ограничения водопотребления на  $1 \text{ м}^3$ , т. е. удельные ущербы, например, металлургического комбината ориентировочно оцениваются цифрами порядка 2—3 руб./ $\text{м}^3$ , а сельскохозяйственного орошения 0,3—0,5 руб./ $\text{м}^3$ . Аналогичная приближенная цифра удельного ущерба от недоданного кубометра воды (свежей) на водоснабжение тепловой электростанции достигает 10 руб./ $\text{м}^3$ . В то же время удельный ущерб, связанный с недоиспользованием  $1 \text{ м}^3$  воды на ГЭС (при напоре 30 м), составляет 0,7 коп./ $\text{м}^3$  (при стоимости 1 квт-ч энергии 10 коп.).



Эти примеры свидетельствуют о резко различном отношении разных отраслей народного хозяйства к перебоям и помогают уяснить требования их к режиму работы водохозяйственной установки. В частности, они показывают, что ущерб от недостатка  $1 \text{ м}^3$  воды на гидростанции во много раз меньше ущерба для других видов предприятий. Действительно, расход свежей воды, равный  $1 \text{ м}^3/\text{сек}$ , обеспечивает работу тепловой электростанции мощностью около 150 тыс. квт, а на ГЭС при напоре 30 м только 250 квт. Отсюда следует, что для разных отраслей народного хозяйства требуется различная надежность бесперебойного водоснабжения и, в частности, для тепловой электростанции более высокая, чем для гидроэлектростанции.

Определение степени надежности работы водохозяйственной установки должно являться предметом технико-экономических расчетов, сопоставляющих затраты на мероприятия, связанные с повышением надежности, и ущербы от перебоев. Ввиду трудности выполнения подобных расчетов на практике обеспеченность гарантированной отдачи обычно назначается в нормативном порядке, на основе опыта проектирования и общих соображений.

Что касается максимальных расходов, то их расчет ведется в соответствии с указаниями «Строительных норм» СН 2—57.

В соответствии с сущностью водохозяйственной задачи, а отчасти по причине исторически сложившейся практики в одних случаях нормирование гарантированного низкого расхода ведется по числу бесперебойных лет, в других — по времени (по продолжительности).

Обеспеченность по числу бесперебойных лет является основной характеристикой. Она принимается во всех случаях, когда водохозяйственная установка осуществляет многолетнее и достаточно глубокое сезонное регулирование стока. Для слабо зарегулированных установок и при отсутствии регулирования, как правило, обеспеченность принимается по продолжительности. Однако для гидроэлектростанций с недостаточным регулированием или работающих на незарегулированном стоке одна из основных водноэнергетических характеристик, а именно годовая выработка энергии все равно определяется при обеспеченности по числу бесперебойных лет. В таких случаях обеспеченность по годовой выработке энергии и обеспеченность других характеристик режима работы гидроэлектростанции, взятых по продолжительности, не будет совпадать.

При воднотранспортном регулировании обеспеченность гарантированного расхода обычно принимается по продолжительности.

По степени надежности работы все отрасли водного хозяйства условно можно выделить в две основные группы. К первой из них следует отнести те, которые предъявляют высокие

требования к бесперебойной работе. Обычным для таких отраслей является обеспеченность не ниже 95% и в отдельных случаях доходящая до 99%, что соответствует вероятности появления перебоев 5—1 раз в столетие. Ко второй группе относятся отрасли водного хозяйства, которые относительно безболезненно допускают некоторые ограничения в подаче воды примерно один раз в 5—10 лет, и даже более частые ограничения; например один раз в 4 года, чему отвечает обеспеченность 80—90 или 75%.

К первой категории прежде всего относится водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий, а также крупных ГЭС, являющихся основным или преобладающим источником энергоснабжения в системе.

Ко второй категории относится орошение, водный транспорт, малые и средние ГЭС, а также крупные ГЭС, входящие в мощную энергосистему, состоящую в основном из тепловых электростанций.

Нормы обеспеченности, обычно принимаемые при проектировании, находятся в следующих пределах (процентах):

#### Водоснабжение:

- |   |    |
|---|----|
| а) крупные промышленные центры и отдельные предприятия, в том числе тепловые электростанции . . . . . | 97 |
| б) небольшие города и сельскохозяйственные поселения, мелкая промышленность . . . . .                 | 95 |

#### ГЭС, когда потребителями энергии являются:

- |  |       |
|--|-------|
| а) крупная промышленность, электрифицированный железнодорожный транспорт, крупные города (в зависимости от веса гидравлической мощности в энергосистеме) . . . . . | 85—95 |
| б) небольшие производственные предприятия и коммунальное хозяйство малых городов и сел (в зависимости от веса мощности ГЭС в системе) . . . . .                    | 75—85 |

Орошение сельскохозяйственных земель (в зависимости от условий водообеспечения) . . . . . 75—95

Водный транспорт (в зависимости от значения водной магистрали — ее класса) . . . . . 90—99

Рыбное хозяйство (в зависимости от рыбопромышленного значения реки) . . . . . 75—95

## § 8. СУММАРНОЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

В итоге расчетов размера и режима водопотребления и водопользования различными отраслями народного хозяйства строятся суммарные графики расходов, отнесенные к водоисточнику, т. е. учитывающие не только полезно используемую воду, но и потери воды как в водоподводящих системах, так и другие виды потерь. В расходах суммарного графика должен

быть учтен возврат отработанных вод в источник, включая и частичный возврат оросительной воды. Указанные графики строятся применительно к рассматриваемым в проекте обеспеченностям.

При проектировании водохозяйственной установки и определении эффекта ее работы следует принимать во внимание места забора воды отдельными потребителями, так как от этого зависит возможность повторного использования воды. Например, если в комплекс входит орошение, энергетика и водный транспорт и забор воды на орошение производится из верхнего бьефа

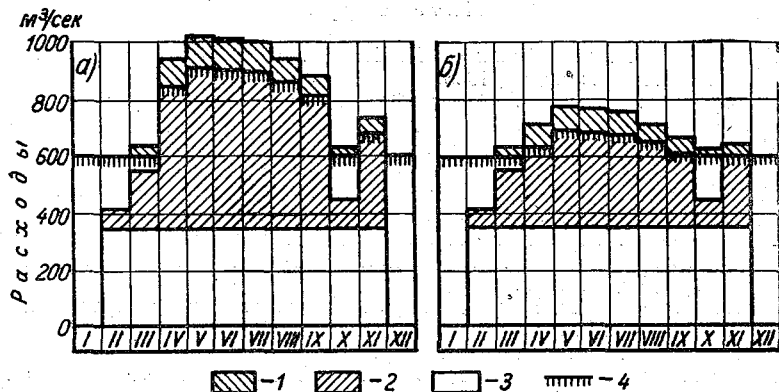


Рис. 17.2. Распределение воды между отдельными отраслями народного хозяйства.

*a* — обеспеченность 80%, *b* — обеспеченность 95%, 1 — забор воды на орошение из верхнего бьефа ГЭС, 2 — потребность в воде на орошение в нижнем бьефе ГЭС, 3 — потребность водного транспорта ниже места отвода воды на орошение, 4 — расходы, используемые на ГЭС.

установки, то вода, предназначенная для оросительных мероприятий, уже не сможет быть использованной для выработки электрической энергии и улучшения транспортных условий в нижнем бьефе. И, наоборот, при заборе воды на орошение из нижнего бьефа она предварительно будет использована в энергетических целях. Возможность же использования этой воды для водного транспорта определяется удаленностью места водозабора на орошение от установки. При расположении водозабора в непосредственной близости от установки исключается возможность использования оросительной воды водным транспортом и т. д.

На графиках суммарного водопотребления должны найти отражение установленные в проекте соотношения между отдельными потребителями воды.

На рис. 17.2 показан пример распределения воды между разными отраслями народного хозяйства при двух градациях обеспеченности (80 и 95%).

В дальнейшем требования на воду со стороны отдельных отраслей и в целом по всему комплексу должны быть увязаны с балансом водохранилища и режимом его работы. Увязанные таким образом суммарные графики расходов водопотребления и водопользования и берутся в основу всех последующих хозяйственных расчетов.

#### Литература

1. Абрамов Н. Н., Гениев Н. Н. и Павлов В. И. Водоснабжение. Госстройиздат, М., 1958.
2. Покровский В. Н. Водоснабжение тепловых электростанций. Госэнергоиздат, М., 1950.
3. Черкасов А. А. Мелиорация и сельскохозяйственное водоснабжение. Сельхозгиз, М., 1950.
4. Розин В. А. Мелиорация с основами сельскохозяйственного орошения. Сельхозгиз, М.—Л., 1954.
5. Куценов В. А. и Штейнгауз Е. О. Вопросы технико-экономического проектирования крупных гидростанций в энергосистемах. Госэнергоиздат, М., 1953.
6. Эрлихман Б. Л. Вопросы гидроэнергетического проектирования. Госэнергоиздат, М., 1953.
7. Шамов Г. И. Речные наносы. Гидрометеиздат, Л., 1954.
8. Россинский К. И. и Кузьмин И. А. Некоторые вопросы прикладной теории формирования речных русел. Сб. „Проблемы регулирования речного стока“, вып. 1. АН СССР, 1947.
9. Чекрышев А. И., Бычков Н. П. и Илинский В. А. Дноуглубление и руслоочищение. Речиздат, М., 1948.
10. Маккавеев Н. И. Руслевой режим рек и трассирование прорезей. Речиздат, М., 1949.
11. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1952.
12. Захаров В. П. и Чокин Ш. Ч. Вывод основных соотношений для определения расчетной обеспеченности работы ГЭС. Изв. АН КазССР, сер. энергет., вып. 1 (13), 1958.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### ПОНЯТИЕ О ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТАХ. ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ УСТАНОВКИ И ВОДОХРАНИЛИЩА

#### § 1. ПРЕДМЕТ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Проектирование водохозяйственных мероприятий представляет собой сложную задачу и ведется в трех основных направлениях:

- а) проектирование собственно мероприятий по эффективному использованию водных ресурсов;
- б) проектирование сооружений, обеспечивающих осуществление этих мероприятий;
- в) проектирование мероприятий, связанных с вредным воздействием гидротехнических сооружений и водохранилищ на существующий режим водотока, условия жизни и хозяйство прибрежных районов.

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

Под водохозяйственными расчетами понимается совокупность расчетов и проектных проработок, включающих в основном разделы:

1. Выявление ресурсов и режима, намечаемого к использованию водного объекта или района.
2. Выяснение требований водопотребителей и водопользователей на воду и к режиму регулирования. Согласование этих требований.
3. Установление водохозяйственного эффекта, который может быть получен от намечаемых мероприятий.
4. Производство расчетов к выбору основных водохозяйственных параметров, определяющих размеры сооружений и водохранилищ, — величина подпора, емкостей водохранилищ, потребных для регулирования низкого и паводочного стока, размеров водосбросных отверстий, мощностей гидроэлектростанций и т. п.

5. Разработка проектного режима и составление правил управления работой водохранилищ, обеспечивающих реализацию намеченных мероприятий.

6. Производство расчетов регулирования стока или водной энергии и составление характеристик режима работы установки или каскада установок.

Водохозяйственные расчеты представляют собой очень важную часть проектирования водохозяйственных мероприятий и потому они должны быть выполнены с возможной тщательностью. Необходимо прежде всего всесторонне изучить режим водотока и учесть влияние на этот режим существующего его использования. Необходимо также правильно оценить потребности в воде со стороны всех отраслей народного хозяйства, удовлетворить запросы которых призваны проектируемые мероприятия, выявить требования к регулированию низкого и паводочного стока и т. д.

Сопоставлением естественного режима стока с намечаемым режимом его использования определяется характер и масштабы необходимого регулирования низкого стока с целью приспосабливания его к нуждам народного хозяйства, характер и масштабы регулирования паводочного стока. Затем производятся сокращенные расчеты для выбора основных водохозяйственных параметров, определяющих размеры сооружений и водохранилищ, и, наконец, производятся подробные расчеты уже при выбранных параметрах. Указанные подробные расчеты, целью которых является получение характеристик режима работы установки или каскада установок, ведутся на основе специальных правил, обычно разрабатываемых применительно к выбранным параметрам сооружений и водохранилищ.

Создание водохранилища, как отмечалось выше, вызывает попутные вредные последствия.

Так, затопляются и подтопляются земли, населенные пункты и промышленные предприятия, происходят деформации русла и берегов, уменьшаются скорости течения, что вызывает выпадение наносов и заиление водохранилищ; в нижних бьефах при этом под воздействием больших скоростей и повышенной транспортирующей способности осветленного потока происходят размывы русла. Под влиянием подпора и регулирования изменяется режим расходов и уровней в верхнем и нижнем бьефах сооружений. В зоне водохранилищ и в нижних бьефах происходят изменения зимнего, термического и ледового режима и т. д.

Прогноз упомянутых изменений режима водотока и оценка влияния его на условия жизни и хозяйство прибрежных районов является задачей ряда дисциплин, смежных с водохозяйственными расчетами. К ним относятся: гидрология, речная гидравлика, динамика русловых потоков, геология и гидрогеология, гидрофизика и др. Непосредственное же проектирование мероприятий, устраняющих вредное воздействие сооружений и водо-

хранилищ на существующий режим водотока, условия жизни и хозяйство так же, как и проектирование основных сооружений установки, служит предметом курса гидротехники и других технических дисциплин.

## § 2. РЕЧНОЙ СТОК КАК ОСНОВА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

### Речной сток

Речной сток служит ресурсами водохозяйственной установки, поэтому для правильного проектирования, строительства и эксплуатации установки необходимо произвести оценку стока на период будущей ее работы. Эта оценка должна учитывать все стороны режима водотока и особенно те его элементы, которые определяют основные размеры и режим эксплуатации установки. Так, если в задачу входит обеспечение потребителей определенным количеством воды, нужно знать характер возможного в будущем маловодья, его длительность, степень уменьшения стока и т. д. Для определения же размеров водосбросных устройств, через которые будут пропускаться в нижний бьеф излишки расходов при проходе по реке половодий и паводков, следует предусмотреть возможные в будущем величины максимального стока.

Как известно, сток формируется под влиянием сложного взаимодействия различных факторов: климатических, геоморфологических, гидрогеологических, почвенных, ботанических и т. п. На формирование стока большое воздействие также оказывает хозяйственно-производственная деятельность человека.

Ввиду разнообразия факторов, обуславливающих сток, и трудности учета их влияния невозможно календарное предвидение стока на длительное время вперед. Поэтому к гидрологическим явлениям применяется вероятностная форма предвидений, основывающаяся на статистических расчетах. В итоге предсказывается лишь повторяемость различных величин стока без указания календарных сроков их наступления. Вероятностная форма предвидений дополняется предвидением изменений стока внутри года, происходящих под влиянием периодической смены фаз, соответствующих временам года.

К указанным двум формам предвидения стока нужно добавить еще срочные прогнозы, опирающиеся на связи стока с гидрометеорологическими характеристиками предшествующего периода. Заблаговременность таких прогнозов обычно не превышает нескольких месяцев, а точность их резко понижается с увеличением заблаговременности.

По мере усовершенствования методики, существенного повышения заблаговременности и точности гидрологических прогнозов вероятностная форма предвидения стока будет дополняться ображениями по его календарной последовательности.

Статистические расчеты применяются к более или менее однородным по происхождению величинам стока, многолетние колебания которых могут рассматриваться как совокупность случайных независимых значений (имеющей место незначительной коррелятивной связью в большинстве случаев можно пренебречь)<sup>1</sup>.

Выделение величин, объединяемых в одну статическую группу, производится путем отбора расходов или стока, занимающих в разные годы одинаковые положения по отношению к фазам годового цикла. Такие величины называются фазово-однородными. Так как фазы сменяются не в одни и те же календарные даты, приходится отказываться от отбора расходов на одинаковые даты и рассматривать в качестве фазово-однородных:

- а) объемы стока за целые годы;
- б) объемы стока за определенные части года (сток весеннего половодья, сток межени и т. д.);
- в) характерные мгновенные расходы (например, максимальные и минимальные в году) и т. п.

Для характеристики многолетних колебаний стока в основном пользуются биномиальной асимметричной кривой распределения вероятностей. В расчетной практике обычно применяется интегральное выражение этой кривой — кривая обеспеченности, которая определяет однозначно среднюю вероятность повторения того или иного значения стока (ординаты этих кривых приведены в приложении (табл. 1 и 2).

Параметрами биномиальной асимметричной кривой обеспеченности, как известно, являются:

среднеарифметическое значение (норма)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}},$$

коэффициент изменчивости

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}},$$

или

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (K - 1)^2}{n - 1}},$$

коэффициент асимметрии

$$C_s = \frac{\sum (K - 1)^3}{(n - 1) C_v^3}.$$

<sup>1</sup> О возможном учете этой связи см. стр. 228 и далее.



При значении  $C_s = 2C_v$  на этой кривой нулевой ординате отвечает обеспеченность 100%. Для характеристики многолетних колебаний стока иногда применяются и другие кривые распределения вероятностей, предложенные Г. Н. Бровковичем, С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем. Кривая распределения вероятностей Крицкого и Менкеля, например, допускает любые соотношения между  $C_s$  и  $C_v$  и этим отличается от биномиальной асимметричной кривой.

Оценка параметров производится по данным гидрологических наблюдений (или косвенными приемами). Суждение об их надежности выводится на основе вычисления среднеквадратических вероятностей ошибок. Полученные таким образом параметры используются в последующих расчетах.

Такой путь решения задачи не всегда является правильным, так как он исходит из неизменности статистических характеристик стока. В действительности же эти характеристики подвержены изменению. Во-первых, за различные, относительно короткие периоды статистические характеристики стока отличаются от тех же характеристик за длительный многолетний период. Во-вторых, прогрессирующее изменение стока под влиянием хозяйственно-производственной деятельности человека влечет за собой изменение его характеристик.

Поэтому статистические характеристики стока, установленные на основе данных наблюдений за истекший период, подлежат уточнению для переноса их на будущее время. Уточнение параметров за счет приводки к длительному многолетнему периоду обычно осуществляется методом гидрологических аналогий. Что касается учета прогрессирующих изменений стока, то при современной разработанности этого вопроса решить его сколько-нибудь точно нельзя. Вследствие этого при проектировании необходимо производить хотя бы приближенную оценку возможных отклонений водохозяйственных показателей установки для ожидаемых изменений параметров стока. С приемами подобной оценки можно познакомиться по работе Я. Ф. Плешкова [5] и др.

### Использование гидрологических материалов в водохозяйственных расчетах

В практике водохозяйственного проектирования обычно применяются два дополняющих друг друга способа использования гидрологических материалов. Один из них принимается в качестве основного, другой — дополнительного.

По первому способу календарный ряд стока за истекший период принимается для непосредственного построения по нему зарегулированного режима, дающего представление о возмож-

ных в будущем формах водохозяйственного плана. Смысл такого способа расчета заключается в стремлении уловить те особенности гидрологического режима, которые свойственны данному водотоку и которые могут быть распространены на предстоящий период эксплуатации установки.

По второму способу конкретный календарный ряд используется для получения вероятностных характеристик стока и их сочетаний. В этом случае исходной при разработке водохозяйственного плана гидрологической характеристикой становится не сам календарный ряд стока, а установленные на базе его статистические параметры, которыми характеризуется кривая обеспеченности.

Принятие того или другого способа за основу обуславливается длительностью имеющегося гидрологического ряда и степенью регулирования стока, определяющей продолжительность циклов сработки и наполнения водохранилища.

При многолетнем регулировании стока цикл наполнения и сработки водохранилища распространяется на длительное время, измеряемое несколькими годами, и чем выше степень регулирования, тем длительнее период, в пределах которого замыкается этот цикл. Очевидно, для правильного решения задачи расчетов многолетнего регулирования стока путем использования календарного гидрологического ряда необходимо, чтобы этот ряд был достаточно длительным и включал бы группировку маловодных лет, дающую критическую сработку водохранилища заданной емкости.

Насколько результаты расчетов многолетнего регулирования по календарным гидрологическим рядам зависят от длительности используемого периода, показывают следующие примеры. По реке Москве за период одинаковой длительности в 20 лет (с 1892 по 1911 г. и с 1912 по 1931 г.) для полного зарегулирования стока требуется емкость водохранилища, различающаяся в 3,5 раза. Подобным же образом для полного зарегулирования стока р. Рейна за 40-летний период (с 1818 по 1957 г. и с 1878 по 1917 г.) требуется емкость водохранилища, различающаяся в 1,5 раза.

Так как в практике обычно приходится иметь дело с рядами ограниченной длительности, не всегда улавливающими различные сочетания стока, то для сколько-нибудь полного выявления условий работы водохозяйственной установки при многолетнем регулировании они оказываются недостаточными. Кроме того, непосредственный анализ гидрологических рядов не дает возможности правильной оценки редко повторяющихся условий работы водохранилища.

Поэтому на основу расчетов многолетнего регулирования по преимуществу берутся обобщенные статистические методы (второй способ). Гидрологические же ряды в этом случае используются лишь при установлении характеристик режима ре-

гулирования и при составлении правил управления работой водохранилища.

При сезонном регулировании стока, когда цикл работы водохранилища замыкается в пределах одного года, выборочные гидрологические ряды обычно бывают достаточными (первый способ). В этих случаях статистические методы привлекаются лишь для получения экстремальных значений стока, не уловленных наблюдениями, и для придания известной строгости расчетам, что особенно важно в связи с необходимостью нормирования.

Каждый из рассмотренных способов использования гидрологических материалов в водохозяйственных расчетах обладает как достоинствами, так и недостатками. К достоинствам расчетов, основанных на непосредственном использовании гидрологических рядов, относится то, что они отличаются большой наглядностью и универсальностью в смысле области применения. Это весьма важно при разработке сложных водохозяйственных планов, при рассмотрении каскадов установок, при компенсирующем регулировании и т. п. Достоинства расчетов, основанных на применении статистических методов, заключаются в том, что они обладают большими возможностями обобщения, что особенно ценно при недостатке гидрологических данных, а также при сопоставлении ряда вариантов. Кроме того, ими в известной мере обобщается совокупность опыта гидрологии по значительному количеству рек в отношении изучения повторяемости явлений стока, поскольку соответствие лежащих в основе этих методов теоретических кривых обеспеченности фактическим стоковым рядом проверено на богатом материале наблюдений.

### § 3. РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

В связи с небольшими масштабами гидротехнического строительства в прошлом первоначальная методика водохозяйственных расчетов находилась на низком уровне и рассматривала лишь элементарные случаи использования водных ресурсов.

Вместе с развитием в нашей стране гидротехнического строительства и внедрением принципа комплексности усложнялось использование водных ресурсов и повышались требования к проектированию. В связи с этим получила большое развитие методика водохозяйственных расчетов, к настоящему времени сформировавшаяся в научно-техническую дисциплину.

Развитие методики водохозяйственных расчетов шло следующими этапами. Построенные в дореволюционный период водохранилища обычно работали обособленно друг от друга и, как правило, осуществляли только сезонное регулирование стока. В соответствии с этим расчеты выполнялись простейшими способами на основе сопоставления в хронологическом порядке расходов притока в водохранилище с расходами потребления и вы-

числения избытков и недостатков воды. Так возникли методы балансовых расчетов. При этом первоначально расчеты выполнялись аналитически — в таблицах, а в последующее время начали применяться графоаналитические и графические приемы расчета.

Первая из опубликованных отечественных работ по методике расчетов регулирования стока была посвящена именно балансовым расчетам в связи с задачей определения оросительной способности рек. Она принадлежит Н. В. Мастицкому и напечатана в 1912 г. в «Известиях собрания инженеров путей сообщения» под названием «Графический способ определения оросительной способности рек». Позднее ряд других авторов вложил много труда в совершенствование методики балансовых расчетов. Нельзя не отметить в связи с этим больших заслуг П. А. Ефимовича, П. А. Ляпичева и др.

Примерно в тот же период за рубежом появилась надобность решать задачи многолетнего регулирования, в связи с чем в 1914 г. в «Известиях Американского общества гражданских инженеров» была опубликована статья Аллена Хазена «Определение регулирующих емкостей водохранилищ для городского водоснабжения» [6]. Хазен на основе статистической обработки результатов расчетов регулирования стока по общему 300-летнему ряду, составленному из наблюдений по 14 разным рекам, получил расчетный график для определения емкости водохранилища. В этой работе Хазен допустил ряд условностей и ошибок, совершенно обесценивших его график, поэтому в СССР последний не нашел практического применения. Однако работа в целом не лишена научного интереса как первая попытка применения статистических методов к расчетам регулирования стока. Советскими исследователями были использованы сама идея и введенные Хазеном некоторые понятия и обозначения.

Садлер в 1927 г. [7] первый обратил внимание на неправильность расчетных графиков Хазена и сделал попытку устранить его ошибки. Но ввиду использования им искусственного ряда, составленного из случайных цифровых выборок путем деления теоретических кривых обеспеченности на пятьдесят равновероятных ступеней, его работа оказалась недостаточно обоснованной и также не получила распространения в СССР.

В Советском Союзе интерес к задачам многолетнего регулирования также возник сравнительно давно — в период первой пятилетки (1928—1932 г.), когда в более широких масштабах начало разворачиваться гидротехническое строительство. В это время появляются предложения по применению теории вероятностей к расчетам многолетнего регулирования стока. В дальнейшем методика расчетов, основанная на применении теории вероятностей, постепенно совершенствуется, расширяется область ее применения, и она прочно входит в практику водохозяйственного

проектирования, являясь дополнением к методике балансовых расчетов. В итоге сейчас мы располагаем достаточно совершенным аппаратом, с помощью которого решаются очень сложные задачи целевого и комплексного использования водных ресурсов. Внедрению и широкому развитию методов вероятностного расчета регулирования мы обязаны С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю, А. Д. Саваренскому, С. И. Рыбкину и др.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель в 1930 г. предложили метод, позволивший определять многолетнюю емкость водохранилища, потребную для регулирования стока на заданную равномерную отдачу с заданной обеспеченностью. Одновременно была предложена схема расчетов сезонной составляющей емкости, что придало методу законченную и удобную форму для практического пользования.

Благодаря работам других авторов область применения метода Крицкого и Менкеля 1930 г. была расширена. П. А. Ефимовичем сделано предложение, касающееся учета коррелятивной связи между величинами годового стока. С. И. Рыбкиным построены номограммы и разработаны зависимости, аналитически решающие задачу.

Метод 1930 г. был не вполне строгим, поэтому теми же авторами в 1935 г. предложен другой метод, основанный на строгом статистическом расчете регулирования. При расчете по методу 1935 г. связываются между собой: коэффициент изменчивости годового стока, многолетняя емкость водохранилища, коэффициент регулирования и процент обеспеченности гарантированной отдачи.

Метод Крицкого и Менкеля 1935 г. дает правильное теоретическое решение, хорошо согласующееся с эмпирическими данными, например, с результатами расчетов по графикам Г. П. Иванова (1938 г.), С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1947 г.) и А. Д. Саваренского (1950 г.), разработанным на базе обобщения итогов расчетов многолетнего регулирования по большому количеству гидрологических рядов различной длительности.

Графики Я. Ф. Плешкова облегчили практическое применение метода Крицкого и Менкеля 1935 г. Расчет по графикам сводится к простейшим операциям. Этот метод нашел широкое применение в практике водохозяйственного проектирования и с успехом применяется в настоящее время.

Методы Крицкого и Менкеля 1930 и 1935 гг. касаются исследований многолетней составляющей общей емкости водохранилища, потребной для многолетнего регулирования стока, и решают частную задачу на жесткий график потребления.

Дальнейшие исследования в направлении отыскания более совершенной и универсальной методики расчетов регулирования стока завершились опубликованием в 1940 г. работ А. Д. Саваренского, С. И. Рыбкина, С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

Метод Саваренского, основанный на построении кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища, дает возможность получить не только обеспеченность гарантированной отдачи, как это позволяет сделать метод Крицкого и Менкеля 1935 г., но и другие элементы режима водохозяйственной установки — распределение вероятностей наполнений водохранилища, дефицитов, сбросов и т. д.

С помощью приемов Рыбкина решается та же задача построения кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища, но несколько отличным путем. Им дано решение ряда водохозяйственных задач, связанных с многолетним регулированием стока.

С появлением указанных работ Саваренского и Рыбкина проблема расчета многолетнего регулирования на жесткий график водопотребления была в основном разрешена. Оставались нерешенными вопросы учета коррелятивной связи между стоком смежных лет, учета сезонных колебаний стока и коррелятивной связи между величинами стока за сезоны, решение задачи расчета на сложный график водопотребления.

Используя идею Саваренского (метод 1940 г.) Крицкий и Менкель в новой своей работе, опубликованной в 1940 г., а также в работе, опубликованной в 1959 г., решили и эти вопросы.

Таким образом, в области методики статистического расчета многолетнего регулирования стока 1940 и 1959 гг. принесли очень большие достижения, благодаря которым большинство водохозяйственных задач, выдвигаемых современным гидротехническим строительством, могут быть решены с необходимой строгостью. До появления рассматриваемых теоретических работ методика водохозяйственного проектирования не вполне отвечала запросам практики гидротехнического строительства.

Большой вклад в дело совершенствования водохозяйственных расчетов внес М. В. Потапов, которым разработаны методы расчетов: а) регулирования стока на переменные оросительные нормы, б) регулирования паводочного стока, в) продвижения волны попуска и др. [9].

Параллельно с методикой расчетов регулирования развивались и другие области водохозяйственных расчетов. В первую очередь к ним следует отнести методику установления эксплуатационных режимов водохранилищ, на основе которой разрабатываются правила управления работой водохранилищ.

Опубликованные работы С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, П. А. Ефимовича и П. А. Ляпичева, относящиеся к 1935—1939 гг., затрагивали эту проблему лишь в самых общих чертах. Также в общих чертах вопросы управления работой водохранилищ рассмотрены и в трудах А. А. Морозова (1948 г.) и С. Н. Никитина (1949 г.).

Более конкретно методика установления эксплуатационных

режимов водохранилищ рассматривается в опубликованном исследовании С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля и Д. В. Коренистова (1950 г.). Однако упомянутое исследование так же, как и прежние работы периода 1935—1949 гг. и более поздние работы П. А. Ляпичева (1950—1952 и 1955 гг.), касаются одного частного случая — сезонного регулирования.

Наиболее полно затронутая проблема освещается в книге Крицкого и Менкеля «Водохозяйственные расчеты», изданной в 1952 г. В ней приводится изложение результатов исследований целесообразных форм использования речного стока и даются общие принципы установления эксплуатационных режимов водохранилищ. Однако и в этой работе методика исследована в основном применительно к задачам глубокого сезонного регулирования; другие же вопросы методики со всем разнообразием видов и масштабов регулирования, комплексности использования и т. д. либо вовсе не затронуты, либо ограничены рассмотрением лишь общих принципов.

В 1953 г. автором завершено обобщение коллективного опыта в этой области, на основе которого, а также использования собственных исследований разработана методика установления эксплуатационных режимов водохранилищ. В указанном обобщении задачи управления работой водохранилищ рассмотрены как в отношении глубины регулирования (сезонное и многолетнее) и режима регулирования (независимое и компенсирующее), так и в отношении вариантов схем водохозяйственного использования, комплексности использования и т. п.

Надо отметить также и последовательное развитие методики водноэнергетических расчетов, значительную роль в котором сыграл С. Н. Никитин и др.

В формировании водохозяйственных расчетов в научно-техническую дисциплину выдающиеся заслуги принадлежат М. В. Потапову. Им составлен учебник «Регулирование стока», первое издание которого вышло в 1933 г. В значительно переработанном и расширенном виде этот учебник издан в 1940 г. и затем вошел в собрание его сочинений (1951 г.). До выхода в свет книги С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля «Водохозяйственные расчеты» (1952 г.) и некоторых других книг учебник Потапова, по существу, был единственным систематическим пособием по водохозяйственным расчетам. В нем отражены достижения советской науки в этой области на уровне знаний 1939 г.

#### **§ 4. НАЗНАЧЕНИЕ И ТИПЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УСТАНОВОК**

Комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающих непосредственное использование воды, регулирование стока или отвод воды из источника в тех или иных народнохозяйственных целях, называется водохозяйственной установкой.

В зависимости от назначения и местных условий на одну установку может быть возложено решение какой-либо одной частной водохозяйственной задачи, например отвода воды из источника для целей водоснабжения, обводнения, сельскохозяйственного орошения, водного транспорта, энергетики и т. д., или целого комплекса задач: по регулированию, использованию и отводу воды. Установку, решающую одну частную задачу, будем называть отраслевой (специальной), а несколько частных задач — комплексной.

Водохозяйственная установка обычно представляет собой весьма сложное соединение в одном месте нескольких гидротехнических сооружений специального назначения. Например, в состав сооружений установки, осуществляющей регулирование стока, как обязательный элемент входит плотина (подпорное

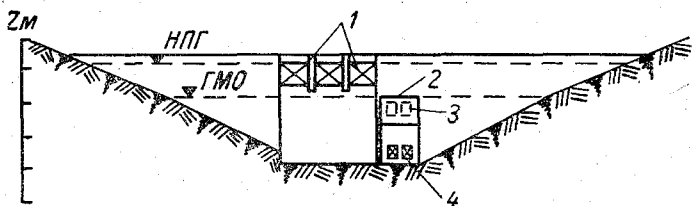


Рис. 1.3. Схематический продольный разрез по оси плотины.  
1 — водослив, 2 — машинное здание, 3 — водоприемные отверстия ГЭС,  
4 — выходные отверстия всасывающих труб турбин.

сооружение) и водосброс, а в состав установки по использованию водной энергии — водоприемник и здание гидроэлектростанции (рис. 1.3). При других местных условиях в состав той же водноэнергетической установки дополнительно может входить плотина, в теле которой может быть осуществлен водоприемник, водосброс, деривация, напорный бассейн, уравнивательная башня и др. В состав сооружений воднотранспортной установки входит плотина, судоходный шлюз, лесосплавные сооружения (лотки, бревнопуски, плотоходы) и т. д.

В состав сооружений комплексной водохозяйственной установки в соответствии с решаемыми ею задачами может входить плотина, водосброс, воднотранспортные устройства, здание гидроэлектростанции, водозаборные устройства, шлюзы-регуляторы и т. п.

Типичными комплексными установками являются: Мингечарская, Волжская ГЭС им. В. И. Ленина, Волжская ГЭС им. XXII съезда КПСС и др., осуществляющие регулирование стока и комплексное его использование в энергетических, воднотранспортных, ирригационных; рыбохозяйственных и других целях.

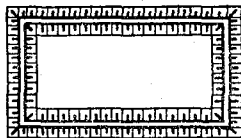


## § 5. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВОДОХРАНИЛИЩ

Под водохранилищем понимается всякий достаточно крупный резервуар, в котором временно накапливается вода для последующего ее использования.

Встречаются следующие типы водохранилищ:

1. Крытые резервуары, устраиваемые из железа, бетона, камня и других материалов. Они располагаются над землей или в земле (полностью или частично) и применяются в водоснабжении как резервуары суточного регулирования или для создания напора.



2. Открытые бассейны, устраиваемые в земле путем выемки или полувыемки, а также путем обвалования на горизонтальной или слегка наклонной местности (рис. 2.3—5.3). Такие водохранилища иногда устраиваются при ГЭС деривационного типа в качестве бассейнов суточного регулирования. Они также применяются в орошении для временного задержания весеннего стока, который используется затем на ниже расположенных площадках или в самом водохранилище (лиманное орошение).



Рис. 2.3. Обвалованное водохранилище на горизонтальной местности.



Рис. 3.3. Обвалованное водохранилище на наклонной местности.



Рис. 4.3. Водохранилище в выемке с обвалованием.

3. Водохранилища, создаваемые в долинах естественных водотоков постройкой подпорных сооружений (плотин, зданий ГЭС, шлюзов и др.). Этот тип водохранилищ имеет наибольшее распространение и значение для народного хозяйства, поэтому ими и будем заниматься в дальнейшем.

По назначению плотины делятся на водоподъемные и вододержательные. Назначение первых сводится к созданию подпора до нужной отметки. Отметка может вызываться требованиями энергетики (обеспечение напора), водного транспорта (обеспечение судоходных глубин в верхнем бьефе сооружений), водозабора и т. п. Назначение вторых — задерживать воду в периоды избытка с тем, чтобы потом использовать ее в период недостатков. Иначе говоря, в задачу вододержательных плотин входит образование водохранилища для регулирования стока.

Указанные типы плотин в современной практике гидротехнического строительства встречаются редко, так как во всех возможных случаях стремятся воспользоваться подпором для образования водохранилища. Поэтому обычно одна и та же плотина выполняет функции водоподъемного и вододержательного сооружения.

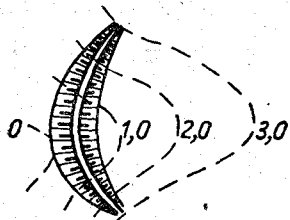


Рис. 5.3. Обвалованное водохранилище в понижении.

## § 6. ПАРАМЕТРЫ ВОДОХРАНИЛИЩ

Различают параметры, которыми устанавливаются основные размеры водохранилища, и параметры, которыми определяются основные правила режима его эксплуатации. Вопрос о правилах эксплуатации в связи с работой водохранилища для удовлетворения требований использующих воду отраслей народного хозяйства будет рассмотрен ниже, в гл. 7. Здесь остановимся на первой категории параметров.

К числу параметров, определяющих основные размеры водохранилища, если не затрагивать вопросов, касающихся регули-

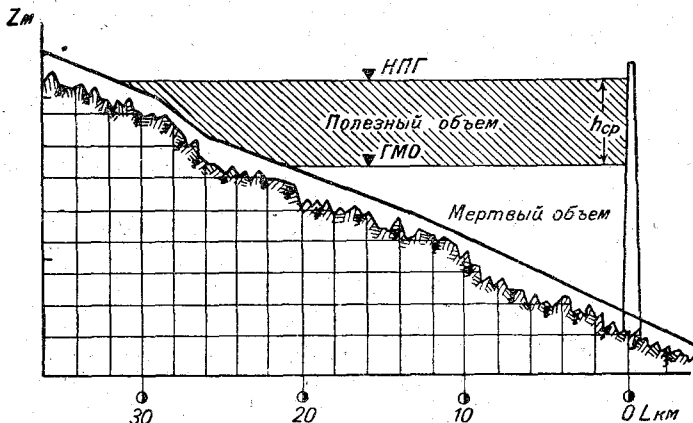


Рис. 6.3. Продольный профиль водохранилища.

рования половодий и паводков (см. гл. 10), следует отнести (рис. 6.3):

- а) нормальный подпорный горизонт (НПГ);
- б) горизонт сработки, или горизонт мертвого объема (ГМО);
- в) полезную емкость ( $V$ );
- г) мертвый объем ( $V_{м.о.}$ );
- д) полную емкость.

Под НПГ понимается высокий горизонт водохранилища, который подпорные сооружения могут поддерживать в нормальных условиях эксплуатации в течение длительного времени.

Частота повторения и длительность стояния НПГ зависят от режима стока и степени его регулирования. При сезонном регулировании этот горизонт достигается ежегодно и удерживается весь период повышенного стока после окончания наполнения водохранилища. Указанная длительность может колебаться в широких пределах — от 0,5—2 до 4—6 месяцев и более. При многолетнем регулировании стока водохранилище до НПГ наполняется не ежегодно, а лишь в многоводные годы и даже в конце многоводных периодов и удерживается наполненным до наступления межени того года, в котором водохранилище наполнилось.

Под ГМО понимается низкий горизонт, до которого срабатывает водохранилище в процессе нормальной его эксплуатации. Частота повторения ГМО также определяется степенью регулирования и режимом стока. При сезонном регулировании сработка водохранилища до ГМО производится ежегодно (к началу половодья следующего водохозяйственного года), в то время как при многолетнем регулировании водохранилище срабатывает до ГМО не ежегодно, а лишь в конце маловодных периодов той или иной длительности.

Под полезной, или рабочей, емкостью водохранилища ( $V$ ) понимается емкость, непосредственно осуществляющая регулирование стока. Она заключена в призме водохранилища высотой  $h_{\text{ср}}$  между НПГ и ГМО.

Мертвый объем водохранилища ( $V_{\text{м.о}}$ ) хотя и не принимает участия в регулировании стока, так как лежит ниже горизонта сработки, но имеет большое практическое значение для водохозяйственной установки. Значение это определяется рядом положений, изложенных ниже.

Полная емкость равна сумме полезной емкости и мертвого объема. Указанные параметры водохранилища рассматриваются применительно к определенному местоположению подпорных сооружений.

### **Основные предпосылки, определяющие местоположение подпорных сооружений водохозяйственной установки и отметку НПГ**

Местоположение подпорных сооружений водохозяйственной установки выбирается на основе учета схемы использования водотока и намечаемой по этой схеме отметки НПГ, геологических, топографических, экономических и других условий.

Так же как и топографические, геологические условия играют важную роль при выборе места под сооружения, так как ими в значительной мере определяется возможная высота плотины,

а отсюда и величина создаваемого подпора. С точки зрения несущей способности, скальные основания являются наилучшими, так как на них обычно допускается строительство очень высоких плотин.

Геологические условия в значительной мере определяют тип сооружения, его размеры и стоимость, мероприятия по борьбе с фильтрацией и их стоимость, а отсюда и общую экономичность водохозяйственного мероприятия.

При выборе места под сооружения водохозяйственной установки обращают внимание также и на другие важные обстоятельства. В частности, стремятся расположить сооружения таким образом, чтобы по возможности избежать затопления особо ценных народнохозяйственных объектов. С этой целью иногда меняют местоположение сооружений, сдвигая их вверх по течению. С другой стороны, стремятся к тому, чтобы сооружения, создающие большие подпоры, не располагались слишком близко от крупных населенных пунктов, промышленных предприятий и т. д. в их нижнем бьефе.

При выбранном местоположении гидроузла отметка НПГ, которая определяет высоту создаваемого подпора и емкость водохранилища, также выбирается с учетом схемы использования водотока, геологических, топографических, экономических и других условий.

Когда геологические условия не ограничивают величины подпора, отметка НПГ будет диктоваться рядом других положений и, в частности, местоположением верхней ступени, нижний бьеф которой должен иметь нормальное подтопление со стороны проектируемой установки. Указанное подтопление желательно довести до величины, обеспечивающей, во-первых, минимум гидравлических потерь напора в бьефе между этими установками и, во-вторых, необходимые горизонты для бесперебойной работы сооружений, отводящих воду из верхнего бьефа установки (на водоснабжение, ирригацию и пр.), а также судоходные глубины и т. п.

Очень большое, а иногда даже решающее влияние на выбор отметки НПГ оказывают экономические условия. Под последним понимаются денежные и материальные затраты, связанные с постройкой самого сооружения и с компенсацией ущерба от затоплений и подтоплений населенных мест, промышленных предприятий, транспортных и других сооружений, сельскохозяйственных угодий и т. п. (см. гл. 12).

Из приведенного видно, что выбор места под постройку подпорных сооружений и выбор отметки НПГ относятся к особо ответственным задачам проектирования водохозяйственной установки, и потому им должно быть уделено очень серьезное внимание. При этом ввиду большого разнообразия влияющих факторов результаты водохозяйственных расчетов не дают

законченного решения и это решение принимается на основе технико-экономического сопоставления различных вариантов, учитывающих также стоимостные и другие показатели.

### Основные предпосылки, определяющие ГМО и МО водохранилища

ГМО и отвечающий ему МО водохранилища должны удовлетворять требованиям, обеспечивающим:

- а) аккумуляцию наносов, задерживаемых водохранилищем в течение всего периода предстоящей его работы;
- б) минимальный напор на гидроэлектростанции;
- в) работу сооружений, отводящих воду из водохранилища: каналов, трубопроводов, насосных установок и т. п.;
- г) судоходные глубины при подходе к выше расположенному гидроузлу и к различным причальным сооружениям, если срабатывание водохранилища до ГМО производится в навигационное время. (Если срабатывание до ГМО осуществляется в зимнее время, ГМО выбирается на такой отметке, которая позволяет восстанавливать к началу навигации необходимый минимальный горизонт водохранилища.)

д) санитарные условия, сводящиеся к недопущению в летнее время мелководий в водохранилище, во избежание образования очагов малярии. (Для соблюдения санитарных условий требуется ограничить летнюю сработку водохранилища или более высокой отметкой, при которой мелководий не будет, или, наоборот, сделать сработку более глубокой и тем самым обнажать мелководья.)

С принятием той или иной отметки ГМО связаны большие или меньшие затраты на устройство отводящих воду сооружений, создание заданных судоходных глубин и т. д., а при энергетическом использовании, когда водохранилище является верхним бьефом ГЭС, этой отметкой определяются основные параметры ГЭС: обеспеченная и минимальная располагаемая мощность, годовая выработка энергии. Поэтому если одно из перечисленных выше требований, например аккумуляция наносов или что-либо другое, прямым образом не лимитирует отметки ГМО, эта отметка также выбирается в результате технико-экономического рассмотрения нескольких вариантов.

### Выбор емкости водохранилища

Выбирая местоположение и отметку НПГ, мы тем самым выбираем и полную емкость водохранилища и максимальный напор на сооружении. Выбирая же отметку ГМО, мы тем самым выбираем глубину сработки ( $h_{ср}$ ) и полезную емкость водохранилища

лица, а также другие параметры, определяющиеся этой отметкой, например гарантированную мощность ГЭС и пр. (см. гл. 9). Таким образом, параметры водохранилища являются взаимно связанными, вследствие чего они подлежат совместному анализу.

Расчеты для выбора параметров водохранилища выполняются в следующем порядке:

а) назначаются варианты местоположения гидроузла и отметки НПГ с таким расчетом, чтобы окончательно выбранная отметка находилась внутри исследуемого диапазона;

б) для каждого варианта отметки НПГ назначается несколько вариантов глубины сработки водохранилища, т. е. отметки ГМО; производятся водохозяйственные расчеты и технико-экономическое обоснование целесообразного ГМО;

в) производится технико-экономическое сравнение вариантов НПГ при принятых для них отметках ГМО, на основе которого окончательно выбирается отметка НПГ, а следовательно, полезная емкость и мертвый объем водохранилища.

Необходимо отметить, что для водохранилищ, являющихся верхним бьефом гидроэлектростанции, целесообразные пределы сработки обычно лежат на отметке ниже НПГ примерно на  $\frac{1}{3} H_{\text{макс}}$ , где  $H_{\text{макс}}$  — максимальный напор. Указанные примерные пределы сработки энергетических водохранилищ установлены из условия нормальной работы гидравлических турбин и могут приниматься на предварительных стадиях проектирования.

## § 7. ПОТЕРИ ВОДЫ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ

С устройством водохранилища связаны потери воды на испарение с его зеркала и на фильтрацию, которые необходимо учитывать в водохозяйственных расчетах. В некоторых случаях подлежат учету и потери воды на ледообразование.

Вода, расходуемая на испарение и фильтрацию в соседние бассейны, теряется для данной реки вообще. Вода, фильтрующаяся в нижний бьеф, теряется лишь для потребителей, использующих воду из верхнего бьефа, а для потребителей, забирающих воду из нижнего бьефа, не является потерей.

Рассмотрим физическую сущность указанных потерь и способы их учета в водохозяйственных расчетах.

### Испарение

Водная поверхность водоема отдает влагу в атмосферу путем испарения, а получает ее в виде осадков. В зоне избыточного увлажнения слой осадков превышает слой испарения и баланс влагообмена водоема с атмосферой положителен. В зоне недостаточного увлажнения, наоборот, испарение превалирует над осадками и баланс влагообмена отрицателен.

При проектировании водохранилища интерес представляет не результат влагообмена, а те изменения, которые вносит создание водохранилища в данные по стоку реки в створе намечаемого гидроузла (иными словами, по притоку в водохранилище).

Дело в том, что водохозяйственные расчеты обычно производятся по стокowym данным, полученным в результате гидрологических наблюдений, и, следовательно, они отражают водный баланс на водосборе в естественных условиях. Но так как водное зеркало будущего водохранилища образуется в пределах того же водосбора, то необходимо учесть изменения в водном балансе на площади, занятой водным зеркалом, по сравнению с балансом до образования водохранилища.

Эти изменения имеют двойкий характер. С одной стороны, суммарное испарение с суши (испарение с почвы и транспирация растительности) заменяется испарением с водной поверхности. С другой стороны, осадки  $x$ , которые выпадали на сушу и частично обрабатывались в речной сток со сдвигом во времени (особенно значительным для зимних снеговых осадков), после создания водохранилища выпадают на водное зеркало и сразу же обращаются в сток (за вычетом испарения с водной поверхности  $z_b$ ).

Поэтому принятый в практике термин «потери воды на испарение с зеркала водохранилища» является условным и неточным, не отражающим указанную выше вторую сторону влияния создания водохранилища. Тем не менее ввиду того что этот термин получил широкое распространение, сохраняем его при последующем изложении с учетом сделанной выше оговорки о его условности.

В соответствии с изложенным выше за «потери воды на испарение с водохранилища» за любой интервал времени (год, месяц, декаду, сутки) принимаем разность между естественным стоком с затопленной части водосбора  $y$  и стоком с зеркала водохранилища

$$y_b = x - z_b, \quad (1.3)$$

т. е. 
$$\Delta y = y - y_b = y - x + z_b = z_b - (x - y). \quad (2.3)$$

При принятом условии для случаев, когда слой стока с зеркала водохранилища  $y_b$  меньше, чем слой стока с водосбора  $y$ , будут иметь место потери стока ( $\Delta y > 0$ ), а при  $y_b > y$ , наоборот, — увеличение слоя стока («отрицательные потери»,  $\Delta y < 0$ ).

Учитывая, что водный баланс водосбора для любого интервала времени может быть выражен уравнением  $y = x - z \pm u$ , где  $u$  — изменение запасов влаги на водосборе, и подставляя это уравнение в формулу (2.3), получаем

$$\Delta y = x - z \pm u - (x - z_b) = z_b - z \pm u. \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) видно, что величина  $\Delta y$  отличается от разности величин испарения с водной поверхности и с суши на величину изменения запасов влаги на водосборе. Выражение (3.3) обычно нельзя применять для определения  $\Delta y$ , так как установление входящих в это выражение величин  $z$  и  $u$  представляет собой сложную задачу, не выполнимую при наличии лишь обычных сетевых данных гидрологических и метеорологических наблюдений. Поэтому практически приходится для определения величины  $\Delta y$  пользоваться выражением (2.3). Пример расчета  $\Delta y$  по этому выражению для двух крупных водохранилищ приводится ниже, в табл. 3.3.

Для одного и того же водосбора величина  $\Delta y$  значительно колеблется на протяжении года.

В самом деле, зимой испарение с водохранилища  $z_v$  практически равно нулю, а снеговые осадки  $x$ , выпадающие на него, как и летом, сразу же и целиком обращаются в сток, так как снег вытесняет воду и соответственно поднимает уровень водохранилища. Таким образом, сток с зеркала водохранилища составляет  $y_v = x$ . Поэтому для зимы выражение (2.3) принимает вид

$$\Delta y = y - y_v = y - x. \quad (4.3)$$

Зимний сток с суши  $y$  (в основном за счет грунтового питания) обычно незначителен и много меньше зимних осадков  $x$ , так как большая их часть накапливается в виде снежного покрова до весны и обращается в сток только в период весеннего снеготаяния. В связи с этим зимой величина  $\Delta y < 0$ , т. е. сток с зеркала водохранилища больше, чем за то же время с поверхности суши (см. табл. 3.3).

Наоборот, в летние месяцы, когда испарение с водной поверхности  $z_v$  превышает осадки  $x$ , величина стока с зеркала водохранилища  $y_v$  отрицательна, т. е. на испарение с зеркала водохранилища, помимо всех осадков, выпадающих на него, затрачивается также некоторая доля стока с незатопленной части водосбора. Поэтому величина  $\Delta y = y - y_v$  является положительной, т. е. летом сток с зеркала водохранилища меньше, чем за тот же период времени с поверхности суши.

В целом за год сток с зеркала водохранилища  $y_v = x - z_v$  может быть и положительным ( $x > z_v$  — для зоны избыточного увлажнения) и отрицательным ( $x < z_v$  — для зоны недостаточного увлажнения). Но даже и в первом случае величина  $y_v$  будет меньше, чем сток с суши, т. е. для годового периода обычно  $\Delta y > 0$  (имеют место фактические потери стока).

Однако, если затоплению подвергаются в основном пойменные, заболоченные или переувлажненные земли, заросшие влаголюбивой растительностью, суммарное испарение с которых близко к испарению с водной поверхности, а в некоторых случаях даже



несколько превышают его, потерь на испарение в целом за год может и не быть ( $\Delta y < 0$ ) или они будут очень малы ( $\Delta y \cong 0$ ).

Иными словами, в последнем случае слой стока  $y$  с территории, подвергающейся затоплению, в выражении (2.3) не может приниматься равным слою стока с водосбора (см. ниже). Это обстоятельство должно учитываться при проектировании.

Для среднееголетних данных в уравнении водного баланса водосбора можно пренебречь членом, выражающим изменение запасов воды на водосборе, и написать его в виде  $\bar{x} - \bar{y} = \bar{z}$ . Подставляя последнее выражение в формулу (2.3), получаем величину среднего годового слоя потерь на испарение с зеркала водохранилища

$$\bar{\Delta y} = \bar{y} - \bar{y}_в = \bar{z}_в - \bar{z}. \quad (5.3)$$

Из выражения (5.3) следует, что для среднееголетних условий сток с зеркала водохранилища отличается от стока с водосбора на разность величины испарения с суши и с водной поверхности, т. е. величина  $\Delta y$  в этом случае действительно представляет собой потери на испарение с водной поверхности по сравнению с испарением с суши.

В приведенных формулах величина  $\Delta y$  выражается в миллиметрах слоя воды. Для определения величины потерь в объемах или расходах необходимо знать площадь водного зеркала водохранилища. При этом в расчет вводится не полная площадь зеркала  $F$ , а дополнительная, т. е.  $F - f$ , где  $f$  — площадь водного зеркала до образования водохранилища.

Средний за интервал времени  $\Delta t$  расход потерь на испарение в  $m^3/сек$  может быть найден по

$$q_{и} = \frac{\Delta y (F - f)}{1000 \Delta t}. \quad (6.3)$$

Здесь  $F$  — средняя площадь зеркала водохранилища в  $m^2$ , которая находится по кривой  $F = f(z)$  при горизонте, отвечающем среднему наполнению водохранилища за интервал времени  $\Delta t$ , выраженный в секундах.

В ряде случаев потери на испарение малы по сравнению с общей отдачей из водохранилища. Иногда эти потери, например в районах Средней Азии, весьма значительны. Так как точность расчета потерь в основном зависит от точности определения величины  $z_в$ , то ее определению, особенно для тех случаев, когда роль потерь велика, необходимо уделять большое внимание.

Для определения  $z_в$  имеется несколько методов. К ним относятся:

- 1) метод водного баланса;
- 2) наблюдения по испарителям или испарительным бассейнам;

3) метод теплового баланса;

4) другие методы, эмпирические формулы и графики.

Первый метод может быть применен только к существующим водоемам, на которых хорошо поставлен учет всех других элементов водного баланса. Результаты определения  $z_b$  по этому методу могут явиться аналогом для вновь создаваемого водохранилища. Таким же путем используются и данные наблюдений в испарителях.

Метод, основанный на расчете теплового баланса [11], а также другие расчетные методы и эмпирические формулы применяются как к существующим, так и к проектируемым водохранилищам.

В настоящее время при проектировании крупных водохранилищ широко применяется метод гидрометеорологического расчета, разработанный в ГГИ А. П. Браславским и З. А. Викулиной [12]. Для расчета по этому методу необходимо располагать метеорологическими данными по району (средние месячные значения температур и влажности воздуха, общей и нижней облачности, скорости ветра и его распределения по направлениям), морфометрическими и гидрологическими характеристиками водохранилища (ширина, форма в плане, распределение глубин, проточность и пр.). По этим данным производится предвычисление элементов, определяющих испарение с водной поверхности: температуры воды, влажности воздуха и скорости ветра над водной поверхностью. Для водохранилищ предгорных областей, регулирующих сток рек ледникового питания, дополнительно необходимо иметь: средние месячные значения температур воды притока, средние месячные уровни водохранилища и кривую объемов водохранилища. Расчетная формула имеет вид

$$z_b = 0,13(e_0 - e_{200})(1 + 0,72\omega_{200}) \text{ мм/сут}, \quad (7.3)$$

где  $e_0$  — максимальная упругость пара, определенная по температуре воды, в миллибарах;  $e_{200}$  — влажность воздуха на высоте 200 см в миллибарах;  $\omega_{200}$  — скорость ветра на высоте 200 см в м/сек.

Для расчета испарения с водной поверхности малых водохранилищ применяется также метод Б. Д. Зайкова [13].

В обоих методах принимается одинаковая по структуре расчетная формула, несколько изменяется лишь числовой коэффициент в ней. Отличие же метода Браславского и Викуловой от метода Зайкова состоит в основном в том, что первый из них включает приемы определения гидрометеорологических элементов над водной поверхностью, необходимых для расчета испарения (см. выше).

Указанными методами можно рассчитать испарение для характерных по засушливости лет или для всего периода гидрометеорологических наблюдений.

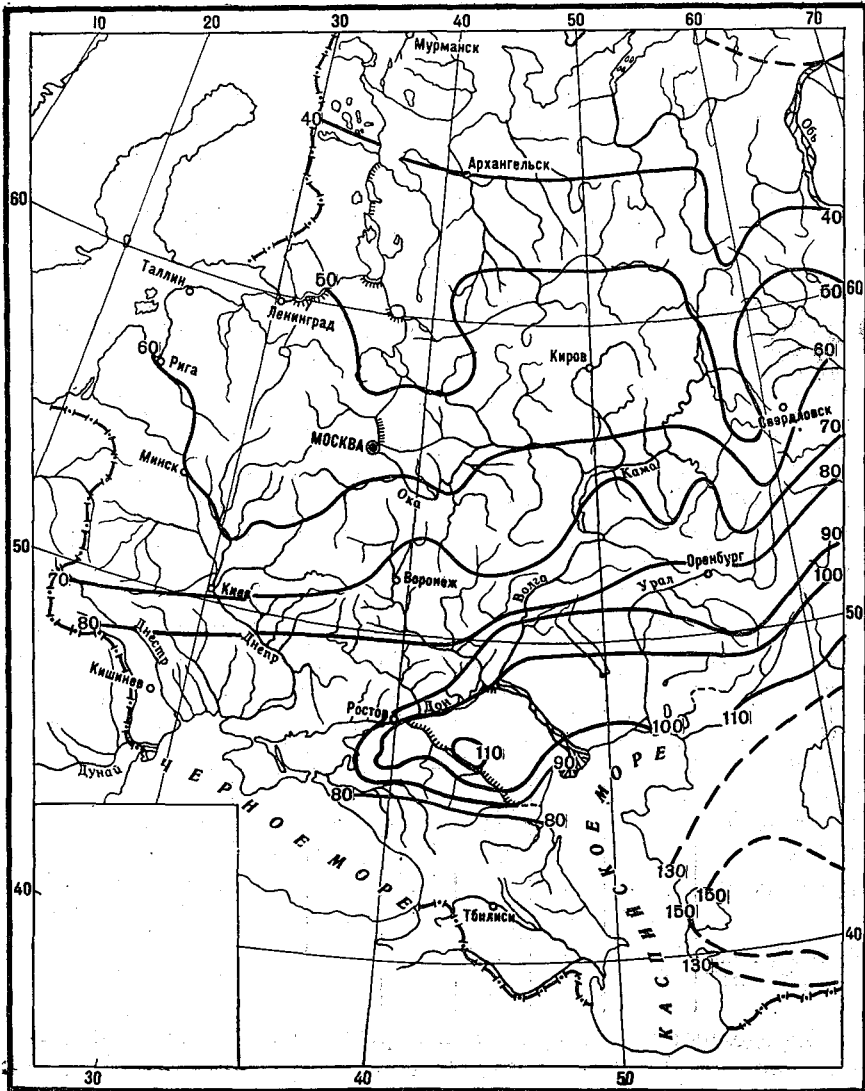


Рис. 7.3. Карта изолиний среднего многолетнего испарения с зеркала малых водоемов в сантиметрах (по Б. Д. Зайкову).

При невозможности выполнить такой расчет из-за отсутствия необходимых исходных данных или при разработке вопросов водного хозяйства на предварительных стадиях проектирования высота среднего слоя испарения берется по картам изолиний, помещенным в упомянутых работах [12 и 13].

Для общего представления о распределении нормы испарения с водной поверхности по территории СССР (рис. 7.3) укажем, что наибольших значений испарение с водной поверхности достигает в Средней Азии, на территории Туркмении — 160 см, а наименьших — на границе лесотундры — 40 см. Постепенно возрастая с севера на юг, испарение в пределах лесной полосы составляет 40—65 см, в лесостепной зоне — 65—80 см, в степной — 80—100 см, в пустыне и полупустыне — 100—160 см.

На величину испарения влияет как площадь водохранилища, так и его глубина: с увеличением площади и глубины испарение уменьшается. Однако проведенные в работе [12] исследования показали, что влияние размеров водохранилища не столь значительно — отклонения величин испарения не превышают 8% (при колебаниях длины разгона ветра от 1 до 100 км и глубины от 2 до 25 м), что лежит в пределах точности расчета.

Внутригодовое распределение среднего испарения с водной поверхности неглубоких (до 5 м) и средней глубины (15—20 м) водохранилищ при среднем разгоне ветра 10 км характеризуется данными табл. 1.3 в процентах от годового [12].

Таблица 1.3

Район	Глубина водохранилища, м	Распределение по месяцам							
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	с XI по III
Северный	до 5		10	19	22	23	16	10	
	15—25		4	9	16	23	18	12	18
Центральный	до 5	5	12	17	19	19	14	9	5
	15—25	3	5	12	14	18	19	16	13
Средней Азии (Туркмения)	до 5	6	11	14	16	16	13	9	15
	15—25	4	9	12	15	17	13	12	18

Определяющие потери на испарение с зеркала водохранилища остальные два члена уравнения (2.3) — осадки  $x$  и сток  $y$  — находятся по данным метеорологических и гидрологических наблюдений.

Осадки принимаются по наблюдениям на метеорологических станциях, расположенных в районе будущего водохранилища или вблизи него, как средневзвешенные (влиянием будущего водохранилища на изменение атмосферных осадков можно пренеб-

речь ввиду отсутствия достаточно надежного метода учета этого влияния и его сравнительной незначительности). Сток принимается по наблюдениям с небольших водосборов, находящихся в условиях, аналогичных с затапливаемой водохранилищем площадью. Наиболее правильно величина стока с площади будущего водохранилища может быть установлена, если на основном водотоке и его притоках имеются гидрологические станции в районе выклинивания подпора и замыкающем створе. Искомая величина стока в этом случае определится по разности стока в замыкающем створе и сумме стока в выше лежащих створах.

Способы учета потерь на испарение в водохозяйственных расчетах зависят от роли этих потерь и от методов расчетов регулирования стока. При выполнении расчетов по календарным гидрологическим рядам потери обычно оцениваются применительно к конкретным гидрометеорологическим условиям исследуемого ряда. В расчетах по обобщенным методам оценка потерь ведется на основе обобщенных характеристик. При многолетнем регулировании, когда сработка водохранилища длится в течение нескольких лет, появляется необходимость определять потери за несколько маловодных лет, следующих друг за другом. Средняя высота слоя потерь для периода  $n$  последовательных лет находится по кривой обеспеченности, характеризующейся коэффициентом изменчивости  $n$ -летки

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}, \quad (8.3)$$

где  $C_v$  — коэффициент изменчивости высоты слоя потерь по отдельным годам;  $n$  — число лет в рассматриваемом периоде (см. гл. 6).

Основываясь на предположении о совпадении маловодья с резкой засушливостью, потери на испарение обычно принимаются с обеспеченностью

$$p' = 100 - p, \quad (9.3)$$

где  $p$  — обеспеченность, с которой проектируется отдача.

Для водохранилищ с малой долей потерь в общем водном балансе допускается учитывать потери в размере среднего многолетнего слоя.

В качестве примера в табл. 2.3 приводятся средние величины испарения с водной поверхности, осадков, стока, испарения с поверхности суши и потерь (в миллиметрах) с зеркала некоторых запроектированных, строящихся и эксплуатируемых водохранилищ [8].

О колебаниях потерь на испарение по годам можно составить некоторое представление по данным водохранилища Сталинградской ГЭС, для которого норма потерь 678 мм/год, коэффициент изменчивости 0,54, коэффициент асимметрии 0, наибольшие по-

тери ( $p'=5\%$ ) 1280 мм/год, наименьшие потери ( $p=95\%$ ) 75 мм/год.

Таблица 2.3

Водохранилище	Область	$z_B$	$x$	$y$	$z$	$\Delta y = z_B - z$
Соликамское . . . . .	Пермская	471	575	252	323	148
Чебоксарское . . . . .	Чувашская АССР	528	494	161	333	195
Саратовское . . . . .	Саратовская	819	377	47	330	489
Сталинградское . . . . .	Сталинградская	999	387	66	321	678

Внутригодовое распределение потерь на испарение для водохранилищ с различной интенсивностью этих потерь в среднем характеризуется данными [8], приведенными в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Месяц	Соликамское водохранилище					Сталинградское водохранилище				
	$z_B$	$x$	$y$	$x - y$	$\Delta y$	$z_B$	$x$	$y$	$x - y$	$\Delta y$
I	0	37	4	33	-33	0	25	1	24	-24
II	0	26	4	22	-22	0	22	1	21	-21
III	0	29	4	25	-25	0	26	12	14	-13
IV	16	27	125	-98	114	31	25	34	-9	40
V	46	51	63	-12	58	109	34	8	26	83
VI	78	57	16	41	37	151	46	2	44	106
VII	94	67	8	59	35	205	41	2	39	166
VIII	100	70	5	64	35	236	42	2	40	196
IX	82	65	6	59	23	156	29	1	28	128
X	47	57	7	50	-3	80	34	1	33	47
XI	8	52	6	46	-38	31	25	1	24	7
XII	0	37	4	34	-33	0	38	1	37	-37
Год	471	575	252	323	148	999	387	66	321	678

### Фильтрация

Подпорные уровни водохранилища почти всегда выше естественного уровня подземных вод в прибрежной зоне. Поэтому устройство водохранилища обычно влечет за собой изменение режима подземных вод. Это изменение сводится к тому, что при повышении уровня водохранилища повышается и уровень грунтовых вод, с чем связана временная утечка воды из водохранилища, а при понижении уровня водохранилища понижается и уровень грунтовых вод, т. е. происходит обратное явление — отток

воды из грунта в водохранилище. Таким образом, грунты ложа водохранилища и его берегов, способные впитывать и удерживать воду, играют роль подземного водохранилища. Как и в наземном водохранилище, следует различать мертвый и рабочий объемы подземного водохранилища.

При первоначальном наполнении водохранилища до горизонта мертвого объема будет заполнен и мертвый объем подземной емкости. Связанные с этим потери воды являются постоянными.

В процессе нормальной эксплуатации водохранилища будет происходить периодическая аккумуляция (с переменным знаком) в рабочей подземной емкости, представляющая собой временный водообмен с наземной емкостью при изменении уровня последнего. За счет этого несколько увеличивается регулирующее значение водохранилища.

Для расчета объема воды  $W$ , впитывающейся в грунт, В. Г. Андреев предложил формулу

$$W = (1 - e^{-tn}) V, \quad (10.3)$$

где  $V$  — подземная емкость до отметки, соответствующей горизонту воды в водохранилище;  $t$  — время впитывания;  $n$  — показатель степени;  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Используя фактические данные насыщения подземной емкости Цимлянского водохранилища за 1952 г., было найдено значение  $n$  при выражении времени насыщения  $t$  в месяцах, и расчетная формула приняла вид

$$W = (1 - e^{-Vt}) V. \quad (10'.3)$$

Расчет по этой формуле дает интегральное (постепенно затухающее) насыщение слоя грунта за  $t$  месяцев с момента начала его заполнения.

Фактические и полученные расчетом по формуле данные насыщения подземной емкости Цимлянского водохранилища за 1952 г. оказались следующими.

Месяц	Подземная емкость, км <sup>3</sup>	Насыщение, км <sup>3</sup>	
		фактическое	расчетное
IV	0,98	0,38	0,42
V	1,97	1,11	1,16
VI	2,03	1,36	1,49
VII	1,98	1,50	1,62
VIII	1,88	1,55	1,66

В 1952 г. полная рабочая емкость Цимлянского водохранилища составила 13,36 км<sup>3</sup>, в том числе подземная емкость 2,03 км<sup>3</sup>, или 15%.

Помимо указанной утечки воды, связанной с изменением режима подземных вод и носящей временный характер, может иметь место постоянная утечка воды на фильтрацию из водохранилища, зависящая от уровня воды в нем и от степени колюматирования ложа.

Различают два пути фильтрации через горные породы, подстилающие чашу водохранилища и служащие основанием подпорных сооружений: а) в соседние речные бассейны и б) в нижний бьеф, в обход подпорных сооружений и под их основанием. К потерям на фильтрацию из водохранилища следует отнести также и утечку воды через неплотности в затворах самих сооружений.

Рассматривая вопрос о фильтрации воды из водохранилища в соседние бассейны, следует различать фильтрационный расход и фильтрационные потери. Под фильтрационным расходом пони-

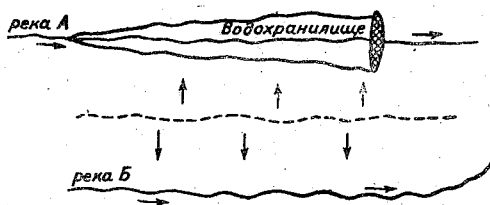


Рис. 8.3. План междуречного массива.

мается объем воды, фильтрующийся в единицу времени. Под фильтрационными потерями при рассмотрении их как составной части водного баланса водохранилища понимается разность между величиной грунтового стока до и после постройки водохранилища, считая грунтовый сток положительным при движении воды к водохранилищу и отрицательным — при движении воды от водохранилища. В водохозяйственных расчетах подлежат учету фильтрационные потери.

Рассмотрим междуречный массив, ограниченный двумя долинами рек *A* и *B* (рис. 8.3), относящимися к различным речным системам [14]. Грунтовые воды междуречья расходуются на питание рек *A* и *B*, а пополняются за счет атмосферных осадков. Пусть в створе плотины реки *A* расход воды равен  $20 \text{ м}^3/\text{сек}$ , который складывается из поверхностного и грунтового стока. При этом по правому берегу реки *A* в пределах влияния проектируемого водохранилища грунтовый сток составляет  $3 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Если создаваемый подпор в долине реки *A* значителен, водораздел грунтовых вод исчезнет и установится постоянная фильтрация в долину *B* с расходом, допустим,  $2 \text{ м}^3/\text{сек}$ . В таком случае водохранилище не только будет терять воду на фильтрацию, но и



утратит грунтовый сток, имевший место до образования подпора. Следовательно, фильтрационные потери составят  $2+3=5 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а не  $2 \text{ м}^3/\text{сек}$ , т. е. 25%, а не 10% расхода реки.

Могут быть и другие соотношения между фильтрационным расходом и фильтрационными потерями. Например, междуречный массив не имеет водораздела грунтовых вод (инфильтрации осадков нет), а река А до подпора имела грунтовый сток (рис. 9.3 а), который затем утратила. Тогда при подпоре до

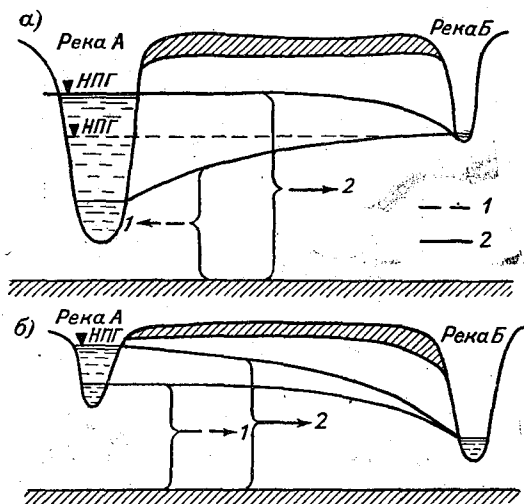


Рис. 9.3. Поперечные разрезы по междуречному массиву.

1 — направление течения грунтовых вод до устройства водохранилища, 2 — после устройства водохранилища.

уровня в реке Б фильтрационный расход будет равен 0, а фильтрационные потери — утраченному грунтовому стоку. При подпоре выше уровня в реке Б появится фильтрация и фильтрационные потери соответственно увеличатся.

Если из реки А до создания водохранилища происходила фильтрация в реку Б (рис. 9.3 б), то после поднятия уровня в реке А фильтрация увеличится. В этом случае расход фильтрационных потерь будет равен разности фильтрационного расхода после и до образования водохранилища.

Так как уровень подземных вод на водоразделе обычно выше подпорных уровней водохранилища, при благоприятных геологических условиях утечка воды в другие речные бассейны практически не наблюдается. При неблагоприятных же геологических условиях, когда водохранилище создается в областях развития

карста (горные породы, растворимые в воде, известковые, гипсоносные и т. п.), утечка воды может оказаться настолько большой, что явится препятствием для намечаемого строительства или потребуются проведение ряда мероприятий по устранению этой утечки.

Практических данных о потерях воды на фильтрацию из существующих водохранилищ известно очень мало, что объясняется трудностью определения потерь в натуре.

И. А. Кузник [15] определил потери воды на фильтрацию методом водного баланса из небольших водохранилищ Заволжья: Толстовского, Домашкинского и Кутулукского. Все три водохранилища расположены в относительно благоприятных геологических условиях. По опыту работы этих водохранилищ можно проследить тенденцию к уменьшению потерь на фильтрацию вследствие кольматирования ложа (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Водохранилище	Слой потерь на фильтрацию, мм/год						
	1937	1937/38	1938/39	1939/40	1940/41	1941/42	1942/43
Толстовское . . . . .	750	570	448	305	505	395	245
Домашкинское . . . . .	650	411	483	451	802	—	—
Кутулукское . . . . .	—	1130	950	375	325	—	—

Наиболее закономерное затухание потерь наблюдалось в Кутулукском водохранилище, которое было заполнено до проектной отметки уже во второй год работы. Два других водохранилища несколько лет работали при неполном напоре и только в 1941 г. заполнились до проектных отметок. Этим и объясняется нарушение закономерности снижения потерь с увеличением срока работы Толстовского и Домашкинского водохранилищ.

Основываясь на данных по водохранилищам в Заволжье, Кузник пришел к выводу, что стабилизация фильтрационных потерь в обычных геологических условиях наступает через 3—4 года после его заполнения до проектных уровней.

Аналогичная закономерность изменения потерь на фильтрацию наблюдалась также из водохранилища Дир Флэт (США), созданного в очень тяжелых геологических условиях. В первые годы наполнения (1909—1911) слой годовых потерь достигал 10 м, а уже через несколько лет к (1917 г.) снизился до 1,4 м.

Вопрос об определении фильтрационных потерь из водохранилищ через горные породы, включая и фильтрацию в обход и под основанием подпорных сооружений (в приведенных

в табл. 4.3 данных по водохранилищам в Заволжье отражены суммарные фильтрационные потери), является задачей гидрогеологических исследований и расчетов. Однако вследствие сложности подобного определения, требующего детальной оценки водопроницаемости слагающих долину горных пород, в водохозяйственных расчетах для периода длительной эксплуатации эти потери в большинстве случаев назначаются приближенно, используя опыт проектирования. При хороших геологических условиях слой потерь обычно принимается не более  $0,5 \text{ мм/сутки}$ , а при средних —  $1\text{--}2 \text{ мм/сутки}$ , что равноценно  $0,18\text{--}0,72 \text{ м/год}$ . Указанные расчетные потери на фильтрацию не учитывают высоты создаваемого подпора и длины напорного фронта, на протяжении которого происходит фильтрация под основанием сооружений. Очевидно, величина подпора и длина напорного фронта оказывают существенное влияние на интенсивность фильтрационных потерь из водохранилища. Это следует иметь в виду при практических расчетах.

Что касается временных фильтрационных потерь при первоначальном заполнении водохранилища и потерь на периодическую аккумуляцию, то для их оценки необходимо определить подземную емкость водохранилища (мертвый и рабочий объемы). С этой целью потребуются произвести планово-высотную съемку существующего зеркала подземных вод и получить данные по геологическому строению долины и скважности слагающих ее горных пород.

Размеры потерь на фильтрацию в гидротехнических сооружениях зависят от конструкции применяемых затворов. Утечка наблюдается через неплотности затворов плотин и через турбины гидроэлектростанций при их остановке (полном закрытии направляющего аппарата).

В плотинах разборчатого типа с укладываемыми на флютбет фермами, в особенности при спицевых затворах, утечка значительна. При металлических затворах благодаря применению уплотняющих устройств в местах примыкания затворов к устоям, промежуточным быкам и порогам утечка резко уменьшается. При устройстве водохранилищ на больших реках этот вид потерь воды существенного значения не имеет. Для водохранилищ на малых водотоках даже небольшая утечка может неблагоприятно сказаться на результатах работы водохранилища. Поэтому при проектировании сооружений надо обратить внимание на усовершенствование уплотняющих устройств.

### Потери на ледообразование

На образование ледяного покрова водохранилища затрачивается некоторое количество воды. Этот покров, оставаясь в водохранилище, вытесняет своим весом то же количество воды, ко-

торое было затрачено на его образование, и на положении уровня водохранилища не сказывается, если водохранилище не срабатывается. С наступлением теплого периода года лед тает и вся вода снова возвращается в водохранилище. Поэтому сам процесс ледообразования никакой убыли воды из водохранилища не вызывает. Он также не вызывает и уменьшения напора на сооружения. Однако поскольку водохранилище зимой срабатывается и площадь зеркала обычно уменьшается, часть льда оседает на берегах. Объем воды, содержащейся в осевшем льде, временно выпадает из водооборота и не может быть использован в период зимней сработки водохранилища. На этот объем воды уменьшается зимний приток к водохранилищу, а весенний соответственно увеличивается за счет всплывания льда при подъеме уровня и его таяния.

Объем воды  $\Delta W_{\text{л}}$ , подлежащий исключению из зимнего водооборота, можно определить по выражению

$$\Delta W_{\text{л}} = h\gamma (F_{\text{н}} - F_{\text{к}}), \quad (11.3)$$

где  $h$  — средняя толщина ледяного покрова водохранилища;  $\gamma = 0,9$  — плотность льда;  $F_{\text{н}}$  и  $F_{\text{к}}$  — начальная (в момент образования ледостава) и конечная (в момент окончания зимней сработки) площади зеркала водохранилища.

Если нет данных об ожидаемой средней толщине ледяного покрова, а известна максимальная толщина  $h_{\text{макс}}$ , выражение (11.3) несколько изменится

$$\Delta W_{\text{л}} = 0,67h_{\text{макс}} \gamma (F_{\text{н}} - F_{\text{к}}). \quad (11'.3)$$

Величина  $\Delta W_{\text{л}}$  условно называется «временной потерей на ледообразование».

Величиной  $\Delta W_{\text{л}}$  учитывается только одна сторона явления, влияющего на водный баланс водохранилища в зимнее и весеннее время.

Дело в том, что для больших водохранилищ (с площадью зеркала, составляющей существенную часть площади водосбора) значительную роль в их водном балансе играют снеговые осадки, выпадающие на ледяной покров [16]. Благодаря вытеснению из водохранилища своим весом равновеликого объема воды эти осадки сразу же обращаются в сток, между тем как осадки, выпавшие на сушу, как известно, обращаются в сток лишь весной. Таким образом, на водный баланс водохранилища снеговые осадки оказывают противоположное с «потерями на ледообразование» влияние: зимой увеличивают приток, а весной — соответственно уменьшают. Если испарение рассчитывается только для периода открытого русла и, следовательно, осадки за зимние ме-

сяцы не принимаются во внимание, в водохозяйственных расчетах необходимо учитывать результирующую величину:

зимой

$$\Delta W_3 = \Delta W_{\text{л}} - \Delta W_{\text{с}}, \quad (12.3)$$

весной

$$\Delta W_{\text{в}} = -\Delta W_{\text{л}} + \Delta W_{\text{с}}, \quad (13.3)$$

где

$$\Delta W_{\text{с}} = h_{\text{с}} F_{\text{к}}. \quad (14.3)$$

Здесь  $\Delta W_{\text{с}}$  — объем «снегового притока»;  $h_{\text{с}}$  — слой воды в снеговых осадках;  $F_{\text{к}}$  — площадь ледяного покрова в конце зимней сработки водохранилища.

Если же расчет потерь на испарение ведется за весь год, как это сделано по Соликамскому и Сталинградскому водохранилищам (см. табл. 3.3), «снеговой приток» оказывается уже учтенным.

Потери воды на ледообразование подлежат учету при сезонном регулировании, т. е. когда водохранилище ежегодно срабатывается до ГМО. При многолетнем же регулировании в большинстве лет водохранилище к концу зимы срабатывается лишь частично и потому объем потерь может быть заимствован из оставшегося переходящего на будущий водохозяйственный год запаса воды водохранилища до восстановления его весной. Однако положение, аналогичное сезонному регулированию, создается в последний год критического маловодья, когда к концу зимы этого года водохранилище срабатывается полностью — до ГМО. В этом случае потери на ледообразование (и снеговой приток) также подлежат учету в водохозяйственных расчетах.

Необходимо отметить, что временное задержание объема  $\Delta W_{\text{л}}$  (или  $\Delta W_3$ ) на берегах понижает уровень водохранилища в зимы всех лет. В водохранилищах, являющихся верхним бьефом гидроэлектростанций, это явление сказывается на напорах, что следует учитывать при проектировании и эксплуатации ГЭС.

### Учет потерь в водохозяйственных расчетах

В практических расчетах потери воды из водохранилища очень часто (конечно, где это позволяют условия) принимаются по средним многолетним их значениям. При этом потери на испарение, как правило, относятся к периоду открытого русла, на фильтрацию — ко всему году и на ледообразование — к периоду зимней сработок водохранилища, а возврат воды и растаявшего льда — к начальному периоду весеннего таяния длительностью в 0,5—1. мес. Для удобства расчетов одновременно с потерями

учитываются объемы воды из водохранилища на нужды различных отраслей хозяйства, например, на шлюзование, орошение, рыбоходы и пр. Расчет удобно вести в форме табл. (5.3).

Таблица 5.3

Вид потерь и отъемов	Объем, м <sup>3</sup>		Расход, м <sup>3</sup> /сек	
	лето	зима	лето	зима
Испарение . . . . .	+		+	
Фильтрация . . . . .	+	+	+	+
Ледообразование . . . . .		+		+
Шлюзование . . . . .	+		+	
Всего . . . . .	+	+	+	+

При рассмотрении в проекте ряда вариантов параметров водохранилища, особенно при дифференцированном учете потерь, для облегчения расчетов иногда строятся вспомогательные гра-

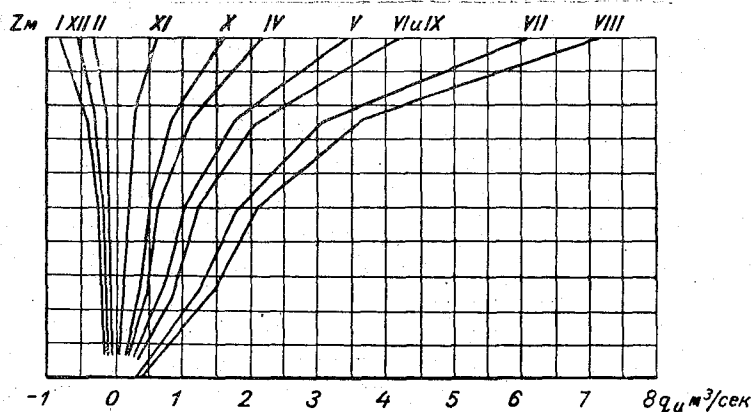


Рис. 10.3. График для расчета потерь воды из водохранилища на испарение в зависимости от горизонта воды  $Z$  и месяца года.

фики — номограммы. Для расчета потерь на испарение примерный вид номограммы, связывающей расход потерь  $q_n$  по каждому месяцу с отметкой уровня  $Z$  водохранилища, показан на рис. 10.3.

### Борьба с потерями

Если ожидаемые потери воды велики, может встать вопрос о борьбе с потерями.

Борьба с потерями на испарение в основном ведется путем уменьшения площади водного зеркала водохранилища. Уменьше-

ние прежде всего должно производиться за счет мелководных участков водохранилища, так как вследствие большого прогрева именно они наиболее интенсивно теряют воду на испарение, а вместе с тем для образования емкости не имеют существенного значения. Поэтому целесообразно исключить мелководья путем снижения подпора или изолировать их от водохранилища.

Известны два способа подобной изоляции мелководий: путем устройства дамб обвалования (рис. 11.3) и устройства «водохранилища с отсеком» (рис. 12.3).

Проект обвалования с целью уменьшения потерь на испарение был составлен для Большого Карагандинского водохранилища на р. Нуре в Средней Азии (1946 г.). Но тщательный анализ эффективности этого мероприятия привел к выводу о его нецеле-



Рис. 11.3. Обвалование водохранилища.

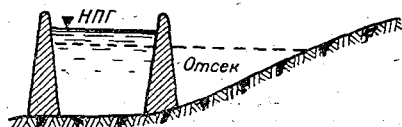


Рис. 12.3. Водохранилище с отсеком.

сообразности вследствие больших затрат на обвалование в данных конкретных условиях. Однако в других условиях обвалование может оказаться достаточно эффективным.

Идея водохранилища с отсеком заключается в том, что наиболее мелководная верхняя (хвостовая) часть водохранилища изолируется от основной его части плотиной. Из отсека к наступлению жаркого времени и в течение всего лета вода перекачивается в основное водохранилище. Так как объем основного водохранилища должен быть равен объему всего водохранилища, то плотины соответственно повышаются. Как отмечает М. В. Потапов, эффективность водохранилища с отсеком сомнительна [9].

Возможно, окажется целесообразным осуществить изоляцию мелководий на некоторых волжских водохранилищах, так как это, помимо уменьшения потерь на испарение, даст и другие выгоды — позволит использовать освобождающиеся из-под воды земли для сельского хозяйства. Затрачиваемая электроэнергия на перекачку воды из «отсека» с лихвой будет возвращена на гидроэлектростанции. Например, если высота качания равна 2 м, а напор гидроэлектростанции 10 м, то при высоте слоя потерь на испарение 700 мм энергии на гидроэлектростанции будет получено в 4,5 раза больше, чем затрачено на перекачку.

В настоящее время производятся эксперименты по борьбе с потерями на испарение на р. Колорадо у оз. Мид (США) умень-

шением температуры поверхностных слоев воды путем перемешивания с холодной водой глубинных слоев. Такое перемешивание достигается нагнетанием воздуха в глубокие слои водоема при помощи подвижных и стационарных компрессорных установок. Практические результаты этого эксперимента пока еще не известны.

Борьба с потерями на фильтрацию через нескальные горные породы, подстилающие чашу водохранилища, может вестись теми же средствами, которые применяются в ирригационных каналах:

а) покрытием ложа водохранилища водонепроницаемой одеждой — бетоном, глинобетоном и т. п.;

б) кольматажем грунта путем искусственного увеличения мутности поступающей в водохранилище воды;

в) пропитыванием верхнего слоя грунта растворами дубильных веществ и железного купороса, образующих в порах грунта непроницаемую пленку.

Если образующие ложе водохранилища породы скальные и имеют трещиноватость или карстовые пустоты, утечка воды из водохранилища устраняется путем цементации этих трещин и пустот.

Указанные меры борьбы с фильтрационными потерями через нескальные горные породы являются трудными и дорогостоящими и потому практически могут быть применены лишь для небольших водохранилищ.

Борьба с потерями на фильтрацию в обход подпорных сооружений и под их основанием ведется путем устройства шпунтовых стенок, цементационных и мерзлотных завес и т. д.

#### Литература

1. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. О некоторых элементах режима работы водохранилищ. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 1, АН СССР, 1947.
2. Андреянов В. Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Гидрометеиздат, Л., 1957.
3. Бурлай И. Ф. О статистических методах расчетов регулирования речного стока. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI, Гидрометеиздат, Л., 1959.
4. Львович М. И. Изменение гидрологического режима под влиянием хозяйственной деятельности. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. II, Гидрометеиздат, Л., 1959.
5. Плешков Я. Ф. Влияние гидрологических изменений и ошибок на отдачу водохранилищ. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 5, АН СССР, 1952.
6. Hazen A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. Transactions of A. S. C. E., 1914.
7. Sudler. Storage required for the regulation of stream flow. Transactions of A. S. C. E., 1927.
8. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1952.
9. Потапов М. В. Регулирование стока. Сочинения, т. III. Сельхозгиз, М., 1951.



10. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения. ч. I, изд. литературы по строительству и архитектуре, М., 1954.
11. Руденко С. И. Испарение с водной поверхности и потери на испарение с больших водохранилищ. Труды ГГИ, вып. 3, 1948.
12. Браславский А. П. и Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилища. Гидрометеоиздат, Л., 1954.
13. Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР. Труды ГГИ, вып. 21, 1949.
14. Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ. Углетехиздат, Л., 1951.
15. Кузник И. А. Потери на фильтрацию из водохранилищ Заволжья. Гидротехническое строительство, № 10, 1947.
16. Андреев В. Г. и Руденко С. И. Об учете влияния ледяного и снегового покрова на водный баланс естественных и искусственных водоемов. Метеорология и гидрология, № 1, 1939.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Исходными данными водохозяйственного проектирования являются материалы гидрологических наблюдений и топографических съемок местности, где намечается создание водохранилища. К их числу также относятся материалы метеорологических наблюдений и общие характеристики геологических и гидрогеологических условий района сооружений и водохранилища.

#### § 1. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Основным источником сведений по гидрологии являются материалы непосредственных наблюдений. К указанным материалам следует отнести данные водомерных наблюдений, измерений расходов жидкого и твердого стока (взвешенных и донных наносов), гранулометрического состава наносов, термического и зимнего режима, химического и бактериологического состава воды.

В проекте отдельной водохозяйственной установки перечисленные гидрологические данные используются по пунктам наблюдений, расположенным в пределах верхнего бьефа на протяжении влияния подпора, а в пределах нижнего бьефа — на протяжении влияния регулирования стока.

В проекте каскадно расположенных 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.

Подробность разработки отдельных гидрологических вопросов зависит как от наличия имеющихся наблюдений, так и от стадии проектирования, а также от решаемых водохозяйственной установкой задач. Длительные и всесторонние наблюдения дают воз-

возможность составить подробную и обоснованную гидрологическую характеристику, обеспечивающую необходимую полноту и точность водохозяйственного проектирования. Непродолжительные же наблюдения и не охватывающие всех элементов режима реки не обеспечивают надлежащей полноты и точности разработки проекта.

Хорошо изученными водотоками обычно являются крупные реки. Для малых, а иногда и для средних водотоков обычным является недостаточность или даже отсутствие данных непосредственных наблюдений. В этом случае приходится восполнять пробелы в данных косвенными путями.

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

На первоначальных стадиях проектирования, например при составлении схемы использования водотока, водохозяйственные расчеты можно основывать на предварительной обработке данных гидрологических материалов с неполным охватом всех элементов режима реки. Водохозяйственные расчеты для последующих стадий проектирования должны основываться на детальной обработке материалов наблюдений с полным охватом (по возможности) всех элементов режима реки. При этом более подробно прорабатываются именно те вопросы гидрологического режима, которые связаны с решаемыми водохозяйственной установкой задачами. В частности, например, если установка будет осуществлять регулирование паводочного стока, в гидрологической записке очень подробно освещаются вопросы максимальных расходов воды, объемов паводков и формы гидрографов. Если в водотоке содержится большое количество наносов, обуславливающих заиливание водохранилища, очень подробно освещаются вопросы твердого стока: мутность, количество и гранулометрический состав наносов и т. д.

Минимальная длительность периода наблюдений, достаточная для гидрологического обоснования проекта водного хозяйства, определяется двумя основными положениями: степенью регулирования стока и репрезентативностью ряда. Для обоснования проекта установки, осуществляющей сезонное регулирование стока, обычно достаточно 15—20 лет, если в состав их входят характерные по общей водности и по распределению стока годы и если по средней водности, по оценке косвенным путем (см.

гл. 5, а также работу [4]), он близок к норме. Для обоснования проекта установки, осуществляющей многолетнее регулирование, такая длительность ряда совершенно недостаточна.

При недостаточной длительности гидрологического ряда в задачу расчетов входит его удлинение и определение статистических параметров стока путем приводки их к длительному многолетнему периоду. Удлинение ряда и уточнение параметров обычно производится по связи со стоком реки-аналога или с метеорологическими данными [2, 3, 4] и др. При полном отсутствии наблюдений или при малой их длительности нередко прибегают к построению искусственного ряда способом Г. П. Иванова, заключающемся в принятии на восстанавливаемой реке такой же последовательности колебаний по годам значений обеспеченности стока, как и на реке-аналоге.

Вместе с тем при осуществлении установкой сезонного или неглубокого многолетнего регулирования стока, когда для обоснования проекта водного хозяйства достаточен период ограниченной длительности, при наличии длинного ряда гидрологических наблюдений из него выбирается расчетный период, по которому и производятся водохозяйственные расчеты (см. гл. 5).

Результатом обработки расчетов и анализа гидрологических и метеорологических материалов должна быть гидрологическая записка, входящая в состав проекта любого водохозяйственного мероприятия. Содержание гидрологической записки должно сводиться к следующему.

### **Физико-географические условия**

В этом разделе дается подробное описание физико-географических условий бассейна, гидрографической сети, особенностей 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 черты климатической характеристики: температурного режима, осадков, влажности, ветра, испарения с открытой водной поверхности.

В районах с развитой ливневой деятельностью необходимо привести характеристику ливней и их влияния 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 (см. гл. 3).

### **Гидрологическая изученность**

Здесь приводится описание проведенных в бассейне наблюдений над уровнями, расходами жидкого и твердого стока, зимнего и термического режима и т. д.

Устанавливается время переноса наблюдений в другие пункты и определяются необходимые поправки для приведения показаний уровней к общему нулю. Отметки нулей графиков водомерных постов даются в единой системе высот (желательно в Балтийской); дается оценка качества гидрологических материалов.

### **Характеристика уровня режима**

Отмечаются особенности уровня режима за отдельные сезоны года и за характерные годы, а также интенсивность нарастания и спада уровней в половодья и паводки, 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.

### **Подсчет стока за период наблюдений**

Излагается принятая методика подсчета жидкого стока. 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 ледоставе и освещается способ подсчета стока при ледоставе и в переходные периоды.

В этом же разделе гидрологической записки приводятся кривые связи расходов и уровней в створах сооружений и в других расчетных створах, устанавливаемые в связи с проведением водохозяйственных и гидравлических расчетов к проекту. Появляется способ построения указанных связей.

### **Характеристика стока. Норма стока**

Дается 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 и удлиняется ряд. Устанавливаются статистические параметры стока: норма и коэффициенты изменчивости, асимметрии. Дается характеристика экстремальных значений годового стока и сопутствующей ему гидрометеорологической обстановки. Отмечаются аномалии в ходе стока — длительность и степень отклонения от нормы маловодий и многоводий. Приводится величина модуля среднемноголетнего стока в целом по всему водосбору и по отдельным его частям.

## Максимальные расходы

Дается характеристика максимальных расходов. Их расчетные величины определяются в соответствии с указаниями СН 2—57 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 возможны в пределах длительного периода года и если есть к этому основания, разбиваются на паводки различной силы, характерные для тех или иных календарных сроков.

Если на водохозяйственную установку возлагается также задача регулирования половодий или паводков, большое значение имеет объем стока за паводок и форма гидрографов. В таких случаях необходимо тщательно анализировать вопрос об объеме паводков и форме гидрографов за период имеющихся наблюдений. Отбираются типичные формы, которые принимаются за модель для построения гидрографов расчетных половодий или паводков. При сложных и разнообразных формах гидрографов в качестве модели принимается не один, а два и более характерных гидрографа. По фактическим данным устанавливается наличие или отсутствие возможности совпадения пика и объема паводка одинаковой вероятности превышения, что учитывается при построении расчетных гидрографов.

Выше рассмотрены требования к построению расчетных гидрографов применительно к задаче проектирования отдельной водохозяйственной установки или верхней установки каскада. При проектировании совместно работающих установок каскада необходимо строить расчетные гидрографы паводков с промежуточных площадей водосбора — между створами верхней и нижней ступени каскада.

Расчетные гидрографы в основных створах и с промежуточных площадей водосбора совмещаются на одном чертеже при строгом соблюдении фактических календарных сроков прохождения паводочных волн с различных частей водосбора.

## Минимальные расходы

Дается характеристика минимальных расходов, отдельно летних и зимних, сроков наступления их и длительности стояния. При необходимости устанавливаются параметры кривой распределения минимальных расходов и определяются расчетные значения этих расходов заданной обеспеченности.

## Термический и зимний режим

Сообщаются сведения о температурах воды и ее изменении по месяцам за характерные годы: жаркий, холодный, средний. Сроки появления осенью в отдельных пунктах водотока 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. Места образования шуги, степень зашугованности русла. Зажоры и их влияние на уровни реки. Характеристика зимних коэффициентов, их изменение во времени и по длине реки.

Сроки первых подвижек льда, начало весеннего ледохода, длительность и мощность ледохода. Характер ледохода по длине реки. Затонные явления, места и причины образования затон, высота подъема уровней при затонах, длина распространения затонных уровней, наличие связи высоты подъема уровней при затонах с расходами. Характер прорыва затон.

### Твердый сток

Мутность воды и зависимость ее от расходов. Характер изменения мутности по времени, ширине, глубине и длине потока. Причины мутности. Количество взвешенных наносов по месяцам, годам и в среднем за многолетний период. Гранулометрический состав взвешенных наносов.

Донные наносы, их количество и состав. Характер деформаций русла в отдельных местах и по длине потока.

### Химический состав воды

Химический и бактериологический состав воды, характеристика загрязненности. Пригодность воды для питьевых, хозяйственно-бытовых и промышленных целей. Агрессивные свойства воды на бетон.

\* \* \*

Приведенные в гидрологической записке данные затем подвергаются некоторой переработке с целью представить их в форме, удобной для выполнения водохозяйственных расчетов.

В частности, сводная ведомость средних месячных и средних годовых расходов 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 межени — начало половодья. Практический смысл принимаемой разрезки заключается в том, что в пределах такого года замыкается определенный этап работы водохранилища: наполнение — сработка.

Поскольку чаще всего расчет ведется по средним месячным значениям расходов, граница водохозяйственного года совмещается с началом первого половодного месяца. При этом хотя от

года к году время наступления половодья календарно не совпадает, границу года следует жестко закреплять, ориентируя ее на более раннее начало половодья. Этим исключается неизбежное искажение стока предшествующей межени высокими расходами начавшегося раннего половодья, когда принимается за начало года среднее или позднее его наступление.

На большинстве водотоков Европейской территории СССР половодье начинается в апреле, в южной части этой территории — в марте, в северной — в мае. На реках Дальнего Востока, например, где повышенный сток обусловливается в основном выпадением летних муссонных дождей и ливней, начало половодья приурочивается к июню — июлю.

В соответствии с этим за начало водохозяйственного года принимается апрель, март, май или июнь — июль и т. п. Форма таблицы средних месячных и средних годовых расходов имеет следующий вид (таб. 1.4).

Таблица 1.4

№ п/п	Год	Средние месячные расходы, м <sup>3</sup> /сек.												Средний годовой расход, м <sup>3</sup> /сек.
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
1	1912/13	145	1061	203	85	121	108	212	91	50	45	47	51	185
2	1913/14	431	1028	105	68	41	38	41	39	39	42	43	53	164
3	1914/15	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.		906	2302	1158	564	570	641	1047	726	213	163	149	97	424
Наим.		36	553	94	67	41	38	41	39	39	42	43	36	164

Представление данных о расходах воды в форме табл. 1.4 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.

## § 2. ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

### Топографические характеристики водохранилища

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



Для получения этих характеристик необходимо иметь материалы крупномасштабной планово-высотной съемки района будущих затоплений, представленных в виде планов местности в горизонталях.

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 съемкам более крупного масштаба.

Площади зеркала водохранилища при тех или иных положениях уровня определяются путем планиметрирования на планах

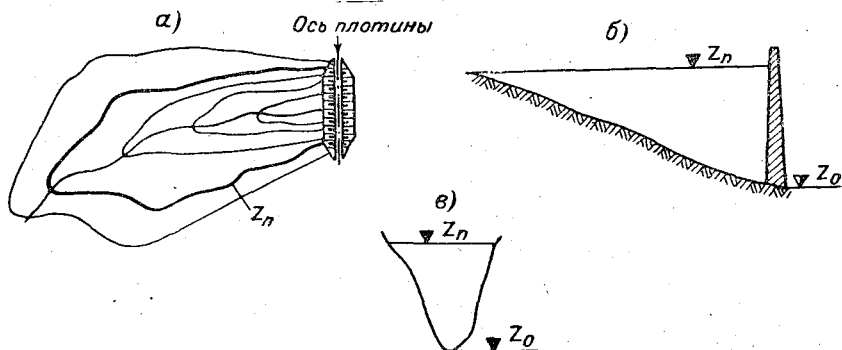


Рис. 1.4. План (а) и продольный профиль водохранилища (б) и поперечный профиль в створе плотины (в).

съемки площадей, ограниченных контурами горизонталей и линией продольной оси подпорного сооружения, замыкающей горизонтали с обоих берегов (рис. 1.4). Для построения зависимости площадей зеркала от отметок уровней необходимо провести планиметрирование площадей зеркала при всех горизонталях в пределах от самой низкой (у дна) при  $Z_0$  до наиболее высокой при  $Z_n$ , до которой возможен подпор (рис. 1.4).

Пусть в пределах намечаемого подпора до отметки  $Z_n$  получен ряд значений площадей зеркала  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , по которым построена зависимость  $F=f(Z)$ , изображенная на рис. 2.4. Площадь заштрихованной полоски высотой  $dZ$ , ограниченная слева осью ординат, а справа линией зависимости  $F=f(Z)$ , представляет собой элементарный объем водохранилища  $dV=FdZ$ . Площадь графика выше линии зависимости  $F=f(Z)$  до этой отметки  $Z$  даст объем водохранилища  $V$ , численное значение которого равно

$$V = \int_{Z_0}^{Z_n} F dZ. \quad (1.4)$$

Для решения этого интеграла необходимо иметь аналитическое выражение для кривой  $F=f(Z)$ . Однако ввиду сложности очертания этой кривой подбор для нее уравнения оказывается обычно невозможным. Поэтому в практике применяется более простой, но достаточно точный способ нахождения ординат кривой  $V=f(Z)$  для любой отметки  $Z$  путем последовательного суммирования от наинизшей отметки  $Z_0$  частных объемов  $\Delta V$ , опре-

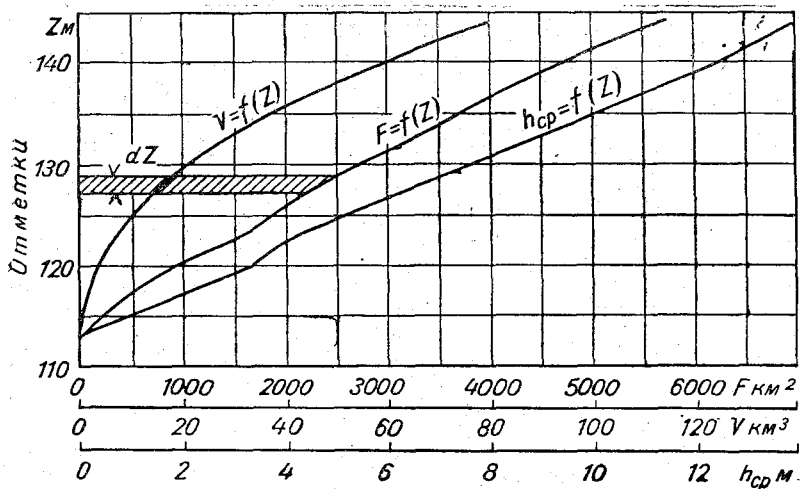


Рис. 2.4. Кривые зависимости площадей зеркала  $F$ , объемов  $V$  и средних глубин  $h_{cp}$  водохранилища от горизонта воды  $Z$ .

деляемых по одному из двух приводимых ниже простых выражений

$$\Delta V = \frac{1}{2} (F_i + F_{i+1}) \Delta Z, \quad (2.4)$$

$$\Delta V = \frac{1}{3} (F_i + \sqrt{F_i F_{i+1}} + F_{i+1}) \Delta Z, \quad (3.4)$$

где  $\Delta V$  — частный объем водохранилища между горизонталями  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$ ;  $F_i$  и  $F_{i+1}$  — площади зеркала водохранилища соответственно на отметках  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$ ;  $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$ .

Формула (2.4) рассматривает объем между плоскостями, проходящими через смежные горизонталы, как призму, а формула (3.4) — как усеченную пирамиду.

В случае когда кривая объемов строится от отметки уреза воды естественного водоема или от наинизшей горизонтали дна  $Z_0$ , для которой соответствующая площадь  $F_0$  имеет конечное значение, первый частный объем подсчитывается также по формуле

(2.4) или (3.4). Если же кривая объемов строится от наиминшей отметки дна в точке, то соответствующая этой отметке величина площади  $F_0=0$  и формула (3.4) принимает следующий вид:

$$\Delta V_{0-1} = \frac{1}{3} F_1 \Delta Z_{0-1}. \quad (4.4)$$

При малом интервале по высоте выражения (2.4) и (3.4) дают близкие результаты, поэтому первое из них как более простое чаще всего и применяется в водохозяйственных расчетах. Определение объемов водохранилища удобно вести в таблице следующего вида (табл. 2.4).

Таблица 2.4

$Z$ м	$F$ км <sup>2</sup>	$\frac{F_i + F_{i+1}}{2}$ км <sup>2</sup>	$\Delta V$ км <sup>3</sup>	$V$ км <sup>3</sup>	$h_{\text{ср}}$ м
0	0	—	$\Delta V_{0-1}$	0	0
1	$F_1$	$F_{\text{ср. 1-2}}$	$\Delta V_{1-2}$	$V_1$	$h_{\text{ср. 1}}$
2	$F_2$	$F_{\text{ср. 2-3}}$	$\Delta V_{2-3}$	$V_2$	$h_{\text{ср. 2}}$
3	$F_3$	$F_{\text{ср. 3-4}}$	$\Delta V_{3-4}$	$V_3$	$h_{\text{ср. 3}}$
4	$F_4$			$V_4$	$h_{\text{ср. 4}}$

Дополнительной характеристикой водохранилища является зависимость средней глубины от отметки наполнения. Средняя глубина  $h_{\text{ср}}$  представляет собой частное от деления объема воды  $V$  на площадь зеркала  $F$  при одной и той же отметке наполнения.

В зависимости от размеров водохранилища площади зеркала выражаются в м<sup>2</sup> или км<sup>2</sup>, объемы — в м<sup>3</sup>, тыс. м<sup>3</sup>, млн. м<sup>3</sup> или км<sup>3</sup> (млрд. м<sup>3</sup>), а средние глубины — в метрах.

По данным таблицы производится построение зависимостей  $V=f(Z)$  и  $h_{\text{ср}}=f(Z)$ . Обычно зависимости  $F=f(Z)$ ,  $V=f(Z)$  и  $h_{\text{ср}}=f(Z)$  совмещаются на одном чертеже (рис. 2.4), на котором шкала отметок (ось ординат) общая, а для  $F$ ,  $V$  и  $h_{\text{ср}}$  шкалы разные.

Форма кривой зависимости  $F=f(Z)$  определяется конфигурацией долины и может иметь неправильные очертания с одним или несколькими переломами. Такое же неправильное очертание может иметь и кривая зависимости  $h_{\text{ср}}=f(Z)$ . В отличие от этого,

зависимость  $V=f(Z)$  выражается плавной выпуклой кривой параболического вида, в пределе (при вертикальных берегах водохранилища) обращающейся в прямую линию. Однако возможен случай, когда в ущелье ширина сечения будет уменьшаться с повышением отметки и кривая зависимости  $V=f(Z)$  на участке этих отметок станет вогнутой.

### Топографические характеристики участка водотока

При схематическом проектировании иногда производится построение подобных рассмотренным выше топографических харак-

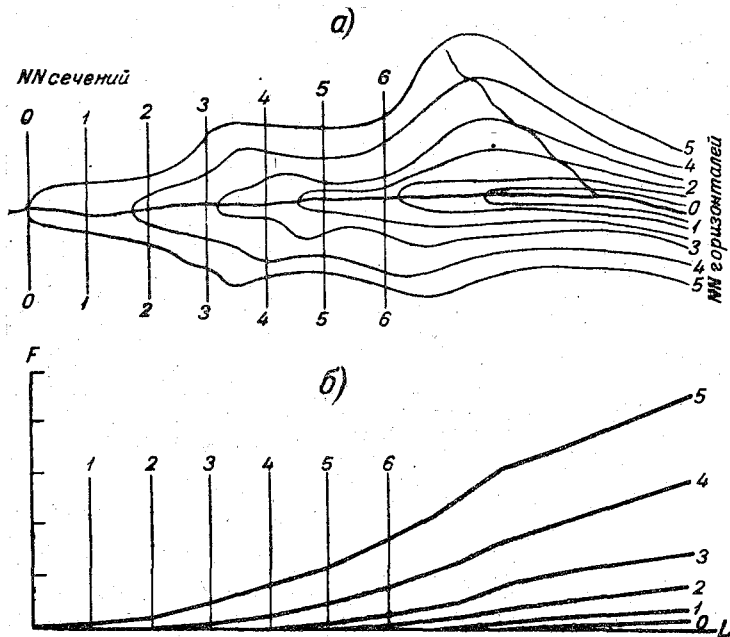


Рис. 3.4. Топографические характеристики участка водотока.  
а — план, б — графики нарастания вдоль водотока площадей зеркала.

теристик для значительного протяжения водотока, в пределах которого намечается строительство ряда гидросооружений. Цель таких характеристик — облегчить предварительное размещение подпорных сооружений по длине водотока и дать возможность быстро построить для отдельных водохранилищ кривые  $F=f(Z)$  и  $V=f(Z)$  при расположении сооружений в любых створах, не проводя специального планиметрирования.

Для построения указанных характеристик все исследуемое протяжение делится сечениями, нормальными к горизонталям, на систему небольших участков с однообразной шириной долины.

Нулевое сечение, от которого ведется счет, проводится через точку с отметкой дна, отвечающей наиболее высокой горизонтали  $Z_n$ . Последнее сечение размещается в нижнем конце рассматриваемого протяжения (рис. 3.4). 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 отметках.

От этих характеристик, используя зависимость (2.4), легко перейти к аналогичным объемным характеристикам.

Построенные указанным путем топографические характеристики обладают следующими свойствами.

1. По ним можно построить зависимости  $F=f(Z)$  и  $V=f(Z)$  для какого угодно водохранилища в пределах исследуемого протяжения. Для этого нужно разрезать графики сечением, расположенным в месте намечаемой постройки подпорного сооружения, и прочесть на шкале соответствующие величины  $F$  и  $V$  при интересующих нас значениях  $Z$ .

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

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

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{dF}{dL} = B, \quad (5.4)$$

б) по графику объемов — площадь живого сечения при соответствующей отметке

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{dV}{dL} = \omega. \quad (6.4)$$

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

### § 3. ПРОЧИЕ МАТЕРИАЛЫ

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

С точки зрения непосредственного водохозяйственного проектирования первые из них (метеорологические наблюдения) необходимы для определения испарения с водной поверхности, расчета ветровых сгонно-нагонных и волновых явлений на водохранилище, зимнего и термического режима в бьефах установки; вторые (геологические и гидрогеологические) — для определения фильтрационных потерь воды из водохранилища и для решения других специальных вопросов (переформирования русла, деформации берегов водохранилища и т. д.).

Характеристика климатических условий обычно дается в гидрологическом очерке. Требования к полноте представляемых материалов по этому вопросу уже рассмотрены в § 1 настоящей главы.

Представляемые в специальной записке материалы по геологии и гидрогеологии должны достаточно полно освещать фильтрационные свойства грунтов, образующих ложе водохранилища и основание сооружений, характер залегания водонепроницаемых пород и положения зеркала подземных вод, режим подземных вод в прибрежных зонах и связь их с подземными водами смежных бассейнов. На основе этих данных гидрогеологи дают заключение по прогнозу фильтрационных потерь из водохранилища как в процессе первоначального наполнения, так и в условиях длительной его эксплуатации.

#### Литература

1. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеоздат, Л., 1952.
2. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. АН СССР, 1950.
3. Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеоздат, Л., 1959.
4. Андреянов В. Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Гидрометеоздат, Л., 1957.
5. Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ. Углетехиздат, М., 1951.

## ГЛАВА ПЯТАЯ

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО КАЛЕНДАРНЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЯДАМ НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ПОТРЕБЛЕНИЯ

### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Регулирование, осуществляемое с помощью водохранилищ, преобразует режим естественного стока в интересах народного хозяйства. Оно позволяет наиболее рационально и полно использовать водные ресурсы страны.

Регулирование стока решает две основные задачи.

А. Повышение низких расходов. Такое регулирование является обычным во всех случаях, когда ставится задача использования стока реки. Выравнивание стока при достаточно емком водохранилище может быть доведено до величины, близкой к среднегодовому расходу воды.

Б. Понижение высоких расходов. В задачу такого регулирования входит борьба с наводнениями на участке реки ниже сооружения или уменьшение размеров отверстий гидротехнических сооружений, сбрасывающих воду вхолостую.

Указанные основные задачи регулирования (А и Б) нередко находятся в противоречии между собой, так как не зная заранее время прохождения и величины высокого стока, мы вынуждены водохранилище держать пустым, а для повышения низкого стока — наполненным, и, следовательно, использование одной и той же емкости водохранилища для решения обеих задач обычно исключается. Совместное решение этих задач регулирования одной и той же емкостью возможно лишь на водотоках со снеговым половодьем, где оправдываемость прогнозов высокая.

Ввиду сложности и некоторой обособленности задач регулирования на повышение низкого и понижение высокого стока вначале рассмотрим вопросы, связанные с повышением низкого

стока. Вопросы же, связанные с понижением высокого стока, будут рассмотрены в гл. 10.

Регулирование на повышение низкого стока осуществляется путем временного задержания в водохранилище избытков стока над потреблением в многоводные периоды и сработкой его в периоды маловодья, когда приток не обеспечивает потребления.

Степень возможного зарегулирования стока для приведения его режима в соответствие с потребностями народного хозяйства зависит от размеров водохранилища, величины и режима контролируемого им стока.

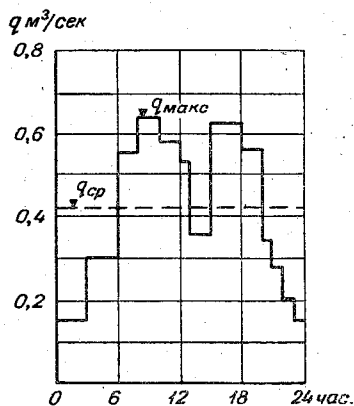


Рис. 1.5. График суточного потребления воды.

малого потребления накапливается в водохранилище, а расходуется в часы повышенного потребления.

Назначение суточного регулирования весьма разнообразно. Укажем два частных случая.

Во-первых, при недостатке воды в источнике суточное регулирование позволяет увеличить число потребляющих единиц. Пусть  $q_{\max}$  — максимальная ордината графика суточного потребления воды, отнесенного к потребляющей единице, а  $q_{\text{ср}}$  — средняя ордината того же графика (рис. 1.5). Тогда количество потребляющих единиц  $S$  будет равно:

при отсутствии суточного регулирования

$$S_1 = \frac{Q}{q_{\max}}, \quad (1.5)$$

при наличии суточного регулирования

$$S_2 = \frac{Q}{q_{\text{ср}}}. \quad (2.5)$$

Отсюда вытекает, что суточное регулирование во столько раз

## § 2. ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

Различают следующие виды регулирования: суточное, недельное, сезонное, многолетнее.

Кроме того, в практике водохозяйственного использования встречается и так называемое неперiodическое регулирование.

Рассмотрим особенности различных видов регулирования стока.

**Суточное регулирование** заключается в перераспределении в течение суток равномерного стока реки ( $Q$ ) в соответствии с неравномерным потреблением воды. Вода в часы



увеличивает число потребляющих единиц, во сколько  $q_{\text{макс}}$  больше  $q_{\text{ср}}$ , т. е.

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{Q}{q_{\text{ср}}} : \frac{Q}{q_{\text{макс}}} = \frac{q_{\text{макс}}}{q_{\text{ср}}}. \quad (3.5)$$

Во-вторых, суточное регулирование позволяет уменьшить пропускную способность водоподводящих и насосных сооружений.

Пусть резервуар суточного регулирования располагается в центре городской разводящей сети (рис. 2.5), тогда мощность насосной станции и пропускную способность магистрального канала можно рассчитывать на средний суточный расход  $q_{\text{ср}}$ . Очевидно, при отсутствии бассейна суточного регулирования насосную станцию и канал необходимо было бы рассчитать на  $q_{\text{макс}}$ .

Большое значение суточное регулирование имеет для повышения использования мощности гидроэлектрических станций (см. гл. 9) и в некоторых других случаях.

**Недельное регулирование** состоит в перераспределении в течение недели (декады и т. д.) равномерного стока в соответствии с неравномерным потреблением воды. Этот вид регулирования осуществляется в тех случаях, когда у водопотребителей имеется общий выходной день, в который используется меньше воды, чем в рабочие дни.

Если суточное потребление воды в рабочие дни  $q_1$ , в нерабочий день  $q_2$ , то при продолжительности недели (декады)  $n$  дней общее потребление воды за неделю составит (рис. 3.5)

$$q_1(n-1) + q_2, \quad (4.5)$$

а средняя величина потребления воды будет равна

$$q_{\text{ср}} = \frac{q_1(n-1) + q_2}{n}. \quad (5.5)$$

Нетрудно видеть, что превышение объема потребления воды над равномерным стоком в рабочие дни

$$V_1 = (q_1 - q_{\text{ср}})(n-1) \quad (6.5)$$

соответствует избытку ее в нерабочий день

$$V_2 = q_{\text{ср}} - q_2, \quad (7.5)$$

т. е. имеет место равенство

$$V_1 = V_2 = V.$$

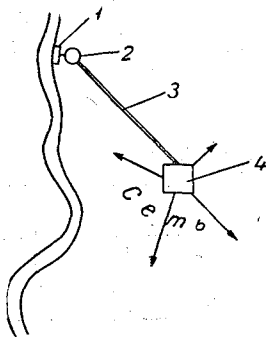


Рис. 2.5. Схема подачи воды.

1 — водозаборное сооружение, 2 — насосная станция, 3 — магистральный канал, 4 — резервуар суточного регулирования.

Величиной  $V$  определяется емкость водохранилища, необходимая для осуществления недельного регулирования. Подставив в выражение (6.5) вместо  $q_{ср}$  его значение по (5.5) и производя простейшие преобразования, получим формулу необходимой емкости

$$V = (q_1 - q_2) \frac{n-1}{n}. \quad (8.5)$$

**Сезонное регулирование** заключается в перераспределении стока из многоводных сезонов года в маловодные. Оно обуславливается внутригодовой неравномерностью стока и несовпадением этого стока во времени с потреблением воды. Это наиболее распространенный вид регулирования.

Сущность сезонного регулирования поясняется рис. 4.5, на котором изображены гидрографы естественного за расчетный

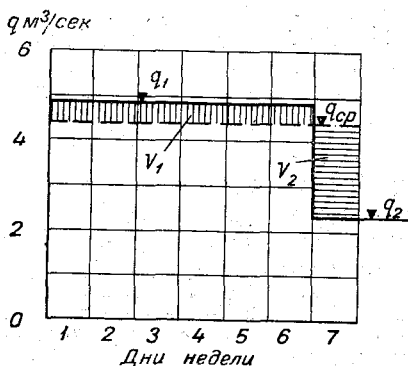


Рис. 3.5. График недельного потребления воды.

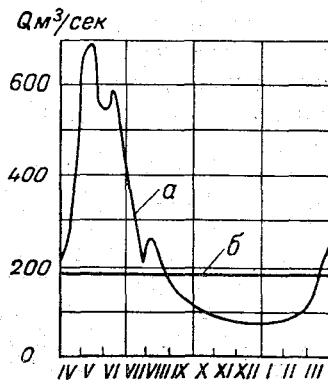


Рис. 4.5. Графики естественных (а) и зарегулированных (б) расходов при сезонном регулировании.

маловодный год и зарегулированного стока, т. е. потребления воды. Последний приводится для простейшего случая сезонного регулирования, когда используемый расход не меняется на протяжении года, т. е. регулирование ведется на постоянный расход.

В период избытков стока над потреблением водохранилище наполняется, а в периоды недостатков — срабатывается. Величина необходимой емкости водохранилища для осуществления сезонного регулирования определяется дефицитом стока, численно равным площади на гидрографе, ограниченной линией зарегулированного расхода и гидрографом в той его части, где приток меньше потребления. Избытки (часть гидрографа над линией зарегулированного расхода) и недостатки (дефицит) балансируются только в том случае, когда регулирование доведено до полного годового, т. е. когда зарегулированный расход равен сред-

нему расходу расчетного маловодного года. Когда зарегулированный расход меньше среднего расхода маловодного года, избытки превышают дефицит, и часть стока после наполнения водохранилища обращается в сброс.

Рассмотренный выше пример представляет наиболее простой случай однократной работы водохранилища, когда оно в течение водохозяйственного года по одному разу наполняется и сбрасывается. При сложном гидрографе притока (при наличии летне-осенних паводков) водохранилище будет работать в два такта и более. В этом случае потребная для сезонного регулирования емкость водохранилища будет зависеть не только от абсолютной

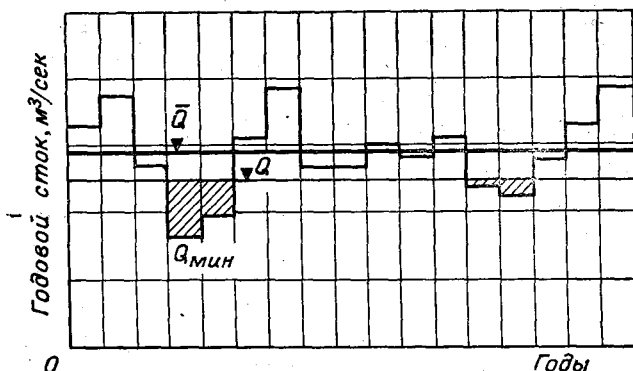


Рис. 5.5. График годового стока.

величины дефицитов и избытков, но и от взаимного их чередования (см. ниже, § 6).

По соотношению между величинами зарегулированного расхода и среднего расхода расчетного маловодного года можно судить о глубине сезонного регулирования. Когда зарегулированный расход приближается к среднему годовому или равен ему, то регулирование следует называть глубоким сезонным. При малых величинах зарегулированных расходов по отношению к среднему расходу расчетного маловодного года сезонное регулирование может быть названо неглубоким. Указанная дифференциация сезонного регулирования на глубокое и неглубокое имеет существенное значение при расчетах емкости и разработке правил управления работой водохранилищ (см. гл. 7).

**Многолетнее регулирование** является наиболее совершенным. Заключается оно в перераспределении стока из многоводных лет и периодов в маловодные (рис. 5.5). Основным признаком многолетнего регулирования является превышение зарегулированного годового стока ( $W = Q \cdot 31,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ) над стоком расчетного маловодного года ( $W_{\min} = Q_{\min} \cdot 31,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ), а при более глубоком

регуливании — превышение зарегулированного стока за  $n$  лет над стоком расчетного маловодного периода той же длительности. Дефицит за  $n$ -лétие (заштрихованные площади на рис. 5.5) покрывается из многолетних запасов воды, создаваемых в водохранилище за предшествующий маловодью многоводный период.

Если при сезонном регулировании цикл работы водохранилища наполнение — сработка замыкается в пределах одного года, то при многолетнем регулировании этот цикл продолжается несколько лет. Чем глубина регулирования больше, т. е. чем ближе зарегулированный расход к среднемноголетнему годовому расходу воды, тем длительнее период срабатывания и наполнения водохранилища. По сравнению с другими видами регулирования для осуществления многолётнего регулирования требуются большие размеры полезной емкости водохранилища, так как, помимо емкости, необходимой для выравнивания многолетних колебаний стока, нужна также емкость и для внутригодового его выравнивания. Потребная емкость водохранилища при многолетнем регулировании резко возрастает с увеличением глубины регулирования.

Теоретическим пределом многолетнего регулирования является полное выравнивание стока до среднего многолетнего годового расхода  $\bar{Q}$ .

**Непериодическое регулирование** отличается от предыдущих тем, что оно не имеет точно закрепленного графика работы. Сработка и наполнение водохранилища осуществляются по мере надобности и возможности. Этот вид регулирования применяется преимущественно в лесосплаве и в специальных случаях на водном транспорте, а также в санитарных, сельскохозяйственных и рыбохозяйственных целях.

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

По сравнению с непрерывным (многолетним, сезонным) непериодическое регулирование, так же как и суточное, в применении к условиям лесосплава страдает существенными недостатками. К ним следует отнести: а) малое протяжение участков действия попусков — не более 30—50 км, а на озеровидных участках — еще меньшее; б) большую потерю воды в старицах и заливах; в) усложнение процесса сплава, худшее использование рабочего времени, образование заторов за счет обсохшего в реке леса и т. п. Однако несмотря на отмеченные недостатки, непериодическое

регулирующие свойства интегральных кривых и изложены способы их построения.

многочисленные экспериментальные расчеты не утрачивают своего значения и сейчас. В этом параграфе рассматриваются методы регулирования интегральных кривых не только для понимания физического процесса регулирования стока и для вспомогательных расчетов и иллюстративных целей. Однако хозяйственном проектировании чаще всего используются лишь те, которые в настоящее время интегральные кривые при водоразделах являются основой для построения расчетных кривых. Поэтому в настоящее время интегральные кривые при водоразделах являются основой для построения расчетных кривых. По мере усложнения задач водохозяйственного использования все больше применяются интегральные кривые как методические основы для построения расчетных кривых при проектировании водохозяйственных расчетов.

В начале развития методики водохозяйственных расчетов в суммарном виде.

глядное изображение хронологической последовательности стока (интегральных) кривых. Интегральные кривые дают наглядное представление в виде гидрографов и суммарных графиков, характеризующих изменение притока и потребности в притоке и потребности.

Расчеты регулирования стока производятся различными методами, но, по существу, все они исходят из сопоставления графиков притока и потребности.

### § 3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КРИВЫЕ СТОКА КАК ОСНОВА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

гося режима, изучаемых в курсе гидравлики.

регулирующие свойства интегральных кривых и изложены способы их построения.

многочисленные экспериментальные расчеты не утрачивают своего значения и сейчас. В этом параграфе рассматриваются методы регулирования интегральных кривых не только для понимания физического процесса регулирования стока и для вспомогательных расчетов и иллюстративных целей. Однако хозяйственном проектировании чаще всего используются лишь те, которые в настоящее время интегральные кривые при водоразделах являются основой для построения расчетных кривых. Поэтому в настоящее время интегральные кривые при водоразделах являются основой для построения расчетных кривых. По мере усложнения задач водохозяйственного использования все больше применяются интегральные кривые как методические основы для построения расчетных кривых при проектировании водохозяйственных расчетов.

В начале развития методики водохозяйственных расчетов в суммарном виде.

глядное изображение хронологической последовательности стока (интегральных) кривых. Интегральные кривые дают наглядное представление в виде гидрографов и суммарных графиков, характеризующих изменение притока и потребности в притоке и потребности.

Расчеты регулирования стока производятся различными методами, но, по существу, все они исходят из сопоставления графиков притока и потребности.

регулирующие свойства интегральных кривых и изложены способы их построения.

многочисленные экспериментальные расчеты не утрачивают своего значения и сейчас. В этом параграфе рассматриваются методы регулирования интегральных кривых не только для понимания физического процесса регулирования стока и для вспомогательных расчетов и иллюстративных целей. Однако хозяйственном проектировании чаще всего используются лишь те, которые в настоящее время интегральные кривые при водоразделах являются основой для построения расчетных кривых. Поэтому в настоящее время интегральные кривые при водоразделах являются основой для построения расчетных кривых. По мере усложнения задач водохозяйственного использования все больше применяются интегральные кривые как методические основы для построения расчетных кривых при проектировании водохозяйственных расчетов.

**Интегральные кривые в прямоугольных координатах**

На гидрографе стока (рис. 6.5 а) выделим элементарную пологую с основанием  $dt$ . Площадь этой пологии определится объемом стока  $dW$  за интервал времени  $dt$

$$dW = Qdt.$$

Площадь всего гидрографа определится суммарный объем стока  $W$  за период  $t$ . Аналитически площадь гидрографа можно выразить интегралом

$$W = \int_0^t Qdt. \tag{9.5}$$

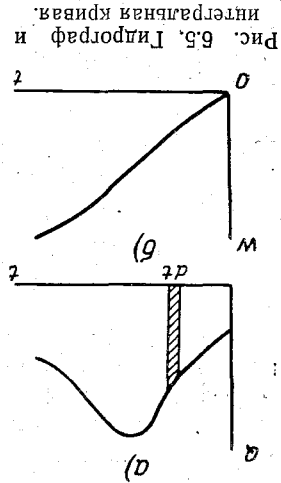


Рис. 6.5. Гидрограф и интегральная кривая.

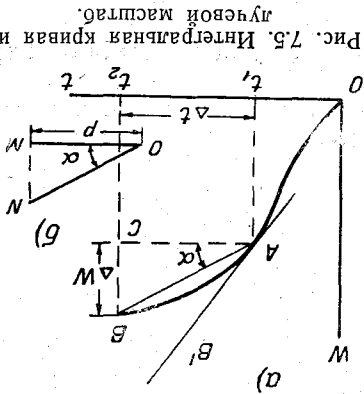


Рис. 7.5. Интегральная кривая и элементарная кривая.

Если последовательно вычислять величины стока  $W_1, W_2, \dots$  соответствующие за интервалы времени  $0-t_1, 0-t_2, \dots$  и откладывать их в каком-то масштабе на оси ординат (рис. 6.5 б), получится кривая, характеризующая изменение суммарного стока за период  $t$ . Эта кривая и носит название интегральной кривой стока. Для вычисления ординат интегральной кривой по выражению (9.5) потребовалось бы проделывать большую работу по подбору уравнений гидрографа, что, однако, не вызывается необходимостью. Практически вполне достаточно вести расчет по конечным разностям. Тогда выражения для определения стока примут вид:

$$\Delta W \text{ за интервал времени } \Delta t$$

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

суммарного стока

$$W = \sum_0^t Q \Delta t. \quad (10.5)$$

Поэтому интегральную кривую называют часто суммарной кривой стока.

При равных интервалах  $\Delta t$ , на которые будет разбит период  $t$ , выражение (10.5) примет вид

$$W = \Delta t \sum_0^t Q, \quad (11.5)$$

где  $Q$  — средние расходы в интервалах времени  $\Delta t$ .

Из метода построения интегральных кривых вытекают следующие их свойства:

1) каждая ордината интегральной кривой представляет суммарный сток от начала построения до данного момента времени;

2) разность ординат в двух точках интегральной кривой равна стоку, протекшему за интервал времени между этими точками;

3) если расход постоянен в пределах какого-то интервала времени, то, согласно (10.5),  $W = Qt$ , т. е. при постоянном расходе интегральная кривая обращается в прямую. Из этого вытекает, что если гидрограф задан в виде ступенек, интегральная кривая будет представлена ломаной линией;

4) тангенс угла наклона  $\alpha$  к оси абсцисс линии, секущей интегральную кривую в точках  $A$  и  $B$ , выражает величину среднего расхода стока в интервале времени между точками  $A$  и  $B$  (рис. 7.5  $a$ )

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = Q_{\text{ср}}; \quad (12.5)$$

5) если точку  $B$  приближать к точке  $A$  и в пределе совместить с нею, секущая обратится в касательную, и тангенсом угла наклона ее к оси абсцисс выразится расход в точке  $A$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dW}{dt} = Q. \quad (13.5)$$

Здесь необходимо отметить, что соотношения (12.5) и (13.5) справедливы лишь в том случае, если интегральные кривые будут построены в численно одинаковых масштабах, например, на оси ординат 1 мм соответствует 1 м<sup>3</sup>, и на оси абсцисс 1 мм — 1 сек. Практически интегральные кривые строятся в различных масштабах, что необходимо учитывать.

Обозначим масштаб объемов через  $m_W$ , а масштаб времени через  $m_t$ . Тогда по рис. 7.5  $a$  длины отрезков  $BC$  и  $AC$  составят:

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

Подставляя найденные значения в (12.5), получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta W}{m_W} : \frac{\Delta t}{m_t} = Q \frac{m_t}{m_W}, \quad (14.5)$$

откуда будем иметь

$$Q = \operatorname{tg} \alpha \frac{m_W}{m_t}. \quad (15.5)$$

Таким образом, для того чтобы определить расход по интегральной кривой, необходимо измерить соответствующий тангенс угла наклона и умножить его на отношение масштабов объемов и времени.

### Лучевой масштаб

Определение расхода с помощью тангенса угла неудобно, поэтому в практических расчетах пользуются специальным графиком, называемым лучевым масштабом, позволяющим по наклону секущей или касательной непосредственно читать расходы. Суть лучевого масштаба сводится к следующему.

В произвольном месте проводится горизонтальный отрезок  $OM = p$ , а через точку  $M$  вертикальная линия (рис. 7.5 б). Проведем через точку  $O$  линию  $ON$  параллельно  $AB$  (рис. 7.5 а), получим треугольник  $ONM$ , подобный треугольнику  $ABC$ . Из подобия треугольников следует, что

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

откуда

$$NM = pQ. \quad (16.5)$$

Следовательно, на вертикальной линии отсекается отрезок  $NM$ , пропорциональный расходу  $Q$ . Иначе говоря, вертикальная линия есть шкала расходов, а рис. 7.5 б в целом — лучевой масштаб. Точка  $O$  называется полюсом лучевого масштаба, а отрезок  $p$  — полюсным расстоянием.

Чтобы построить лучевой масштаб, необходимо задаться удобным масштабом шкалы расходов  $m_Q$  и определить  $p$ .

Имея в виду (12.5) и (13.5), выражение (16.5) перепишем в виде  $NM = pt \operatorname{tg} \alpha$ . Далее, принимая во внимание (14.5), получим

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

а после преобразований найдем

$$p = \frac{m_W}{m_Q m_t}. \quad (17.5)$$



Лучевой масштаб позволяет также по заданному гидрографу построить интегральную кривую. Пусть будет задан гидрограф в виде ступенек с расходами  $Q_1, Q_2 \dots$  (рис. 8.5). Масштабы расходов  $m_Q$  и времени  $m_t$  известны из чертежа. Задав масштаб объемов  $m_W$ , вычисляют полюсное расстояние  $p$ , которое откладывают влево от гидрографа. Затем на шкалу расходов сносят расходы. Соединив их с полюсом, получим лучи, наклон которых соответствует наклону отрезков интегральной кривой в пределах каждого из расходов. Далее проводится от начала гидрографа первый луч (по  $Q_1$ ), от конца его второй (по  $Q_2$ ) и т. д. Ломаная линия 1—2—3—4 и будет интегральной кривой в принятом масштабе  $m_W$  и в масштабе времени  $m_t$ , заданном гидрографом.

Однако измерение расходов на интегральной кривой с помощью лучевого масштаба имеет существенный недостаток, заключающийся в невысокой точности переноса по чертежу (с помощью линейки и треугольника) направления сравнительно коротких отрезков с интегральной кривой на лучевой масштаб. Поэтому для уточнения определения величин расходов на интегральной кривой или для проверки проведения на графике интегральной кривой отрезков, соответствующих заданному расходу (см. ниже), в практике принято применять также графоаналитический и аналитический способы, основанные на использовании зависимости (12.5). Для этого за выбранный интервал времени  $\Delta t$  находится приращение стока  $\Delta W$  и по (12.5) — расход. Графически  $\Delta W$  находится путем измерения в масштабе  $m_W$  вертикального расстояния в конце  $\Delta t$  между интегральной кривой и горизонтальной линией, проходящей через точку на кривой в начале данного интервала времени, а аналитически — по таблице к интегральной кривой, по разности суммарного стока в конце и начале  $\Delta t$ .

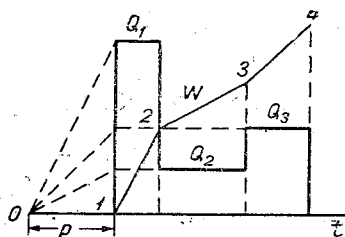


Рис. 8.5. Гидрограф, лучевой масштаб и интегральная кривая стока.

### Подсчет и построение интегральных кривых

В зависимости от требований проектирования, наличия исходных стоковых данных и общей продолжительности рассматриваемого периода интегральные кривые строятся с различной подробностью: по суточным, пятидневным, декадным, месячным, сезонным и годовым интервалам времени. Наиболее часто они строятся по месячным интервалам. Тогда исходными являются средние месячные расходы.

Таблица, в которой рассмотрен пример подсчета интегральной кривой, имеет следующий вид (табл. 1.5).

Таблица 1.5

№ п/п	Дата (интервал)	Расход $Q$ $м^3/сек$	Объем за интервал $\Delta W = Q \Delta t$ $10^n м^3$	Суммарный объем $W$ , на конец интервала $10^n м^3$
1	2	3	4	5
1	1919—IV	145	0,38	0,38
2	V	1061	2,79	3,17
.	.....	....	....	....
		$\Sigma Q = 4187$	Постраничная проверка	
		$W = \Delta t \Sigma Q = 4187 \times 2,63 \times 10^6 = 10,99 км^3$		

При подсчетах обычно принимается следующее число 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, во избежание прочетов, которые все равно обнаружатся при построении интегральной кривой, необходимо делать последовательную постраничную проверку таблицы: переходить к суммированию стока на следующей странице (к заполнению графы 5) допускается лишь после проверки вычисления на предыдущей. Эта проверка заключается в том, что  $\Delta t \Sigma Q$  данной страницы должна быть практически равна разности последних цифр суммарных объемов  $W$  данной и предыдущей страниц (здесь  $\Sigma Q$  — постраничная сумма расходов).

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

### Интегральные кривые в косоугольных координатах

Прямоугольные координаты не дают возможности построить интегральную кривую за длительный период на чертеже нормального размера по высоте без существенного уменьшения масштаба

объемов. В результате этого интегральная кривая теряет наглядность и становится малопривлекательной для проведения по ней расчетов регулирования. Поэтому в практике проектирования обычно используются разностные (сокращенные) интегральные кривые, которые могут быть представлены и как интегральные кривые в косоугольных координатах. Преимуществом этого вида кривых является то, что при нормальных размерах высоты чертежа масштаб объемов не уменьшается и на кривой более отчетливо выражены отдельные характерные

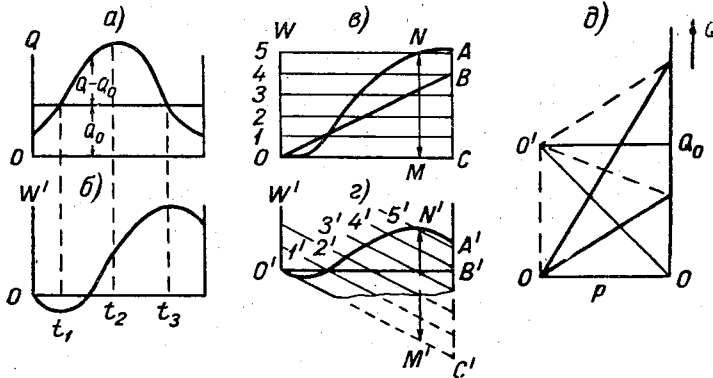


Рис. 9.5. Гидрограф (а), разностная интегральная кривая (б), интегральные кривые в прямоугольных (в) и в косоугольных координатах (г) и лучевой масштаб (д).

периоды в питании реки — половодье, межень, многоводные и маловодные годы и периоды и т. д. Это делает такую интегральную кривую наглядной и чрезвычайно удобной для выполнения расчетов регулирования.

Чтобы построить разностную интегральную кривую, на гидрограф стока (рис. 9.5 а) нанесем некоторый постоянный расход  $Q_0$ , вычтем его из всех расходов  $Q$  и будем интегрировать или суммировать разности  $Q - Q_0$ . Тогда получим

$$W' = \int_0^t (Q - Q_0) dt = \sum_0^t (Q - Q_0) \Delta t,$$

или

$$\begin{aligned} W' &= \int_0^t Q dt - \int_0^t Q_0 dt = \sum_0^t Q \Delta t - \sum_0^t Q_0 \Delta t = \\ &= W - W_0, \end{aligned} \quad (18.5)$$

где  $W$  — ордината обычной интегральной кривой;  $W_0$  — ордината интегральной кривой заданного постоянного расхода  $Q_0$ , т. е.

условного равномерного стока. Откладывая величины этих ординат на нижнем чертеже (рис. 9.5 б), получим разностную (сокращенную) интегральную кривую.

На рис. 9.5 в линия  $OA$  отвечает интегральной кривой стока в прямоугольных координатах, а линия  $OB$  (прямая) — постоянного расхода  $Q_0$ . Согласно (18.5), ординаты разностной интегральной кривой равны отрезкам между линиями  $OA$  и  $OB$ . Следовательно, кривая  $O'A'$  (рис. 9.5 г) — та же кривая  $OA$ , но построенная таким образом, что прямая  $OB$  заняла горизонтальное положение  $O'B'$ , а прежняя ось абсцисс  $OC$  — наклонное  $O'C'$ . При этом, очевидно, любой вертикальный отрезок  $M'N'$  между  $O'A'$  и  $O'C'$  равен отрезку  $MN$  между  $OA$  и  $OC$ . Отсюда кривую  $O'A'$ , являющуюся по отношению осей  $O'B'$  и  $O'W'$  разностной интегральной кривой, по отношению осей  $O'C'$  и  $O'W'$  можно рассматривать как интегральную кривую в косоугольных координатах. Для проверки правильности этой интегральной кривой на всем ее протяжении, удобства построения (см. ниже) и отсчета полных ординат проводят ряд прямых, параллельных  $O'C'$  и отвечающих круглым значениям величин стока на оси  $O'W'$ . Эти параллельные линии служат косоугольной координатной сеткой и выполняют роль шкалы полного стока  $W$ .

По сравнению с прямоугольными интегральные кривые в косоугольных координатах обладают рядом отличительных свойств, а именно:

1) так как для отдельных периодов  $Q < Q_0$ , то кривая в эти периоды может опускаться;

2) разность ординат кривой в двух точках

$$\begin{aligned} W_2' - W_1' &= \int_0^{t_2} (Q - Q_0) dt - \int_0^{t_1} (Q - Q_0) dt = \int_{t_1}^{t_2} Q dt - \\ &- \int_{t_1}^{t_2} Q_0 dt = W_2 - W_1 - Q_0(t_2 - t_1); \end{aligned} \quad (19.5)$$

$$3) \quad \frac{dW'}{dt} = Q - Q_0, \quad (20.5)$$

т. е. тангенс угла наклона касательной с осью абсцисс выражает разность расходов  $Q - Q_0$ . По аналогии с этим тангенс угла наклона секущей выражает разность  $Q_{ср} - Q_0$ .

Из (20.5) вытекает, что

$$\frac{dW'}{dt} = 0,$$

иначе говоря, в таких точках (точки перелома) интегральная кривая имеет максимум или минимум;

4) если заданный постоянный расход  $Q_0 = Q_{\text{ср}}$ , заключительная ордината  $W'$  приходит в 0;

5) лучевой масштаб строится как и для интегральной кривой в прямоугольных координатах. Но если учесть, что здесь суммируются разности  $Q - Q_0$ , то, чтобы отнять от каждого расхода  $Q_0$ , достаточно полюс 0 приподнять на величину  $Q_0$  (рис. 9.5 д).

### Подсчет и построение интегральных кривых в косоугольных координатах

При построении интегральных кривых необходимо иметь в виду, что для разностной интегральной кривой косоугольная сетка не обязательна, так как ординаты кривой наносятся от прямой постоянного расхода, совпадающей с горизонтальной осью, а для интегральной кривой в косоугольных координатах не обязательны нарастающие разности  $W - W_0$ , так как ординаты полного суммарного стока  $W$  можно непосредственно наносить на чертеж, откладывая их от косоугольной сетки. Практически, однако, разности  $W - W_0$  позволяют ускорить построение интегральной кривой в косоугольных координатах, поэтому разности, как правило, вычисляются.

Подсчет интегральной кривой ведется в таблице, которая отличается от табл. 1.5 двумя дополнительными графами: шестой для  $W_0$  и седьмой для  $W - W_0$ .

Выбор условного равномерного стока следует производить одновременно с выбором масштабов. Обычно  $\Delta W_0 = Q_0 \Delta t$  принимается равным ближайшему круглому числу к величине среднего за расчетный интервал  $\Delta t$  стока  $\Delta W_{\text{ср}}$ , при котором при выбранных масштабах объемов и времени косоугольная сетка по отношению к прямоугольным координатам окажется повернутой на тангенс угла 1:1; 1:1,5; 1:2; 1:2,5; 1:3. Величина среднего стока вычисляется по выражению

$$\Delta W_{\text{ср}} = \frac{W}{n}, \quad (21.5)$$

где  $W$  — суммарный сток за весь период;  $n$  — общее число интервалов.

Масштаб для шкалы времени (горизонтальная ось) берется таким же, как и при построении интегральной кривой в прямоугольных координатах (см. стр. 170). При удачно выбранном равномерном стоке и масштабах интегральная кривая располагается вдоль горизонтальной оси, представляющей фиктивную шкалу времени (фактическая шкала времени проходит ниже, под углом, см. рис. 9.5 г).

При выборе  $\Delta W_0$  и масштабов необходимо следить также и за тем, чтобы интегральная кривая как внутри, так и в конце пе-

риода не сильно отклонилась от горизонтальной оси и не вышла за пределы принятых размеров чертежа.

Пусть требуется построить интегральную кривую в косоугольных координатах по месячным интервалам за 35-летний период. Средний месячный сток равен  $1,26 \text{ км}^3$ . Масштаб времени  $3 \text{ мм} : 1 \text{ мес}$ .

Принимая во внимание, что параллельные линии косоугольной сетки являются шкалой объемов, они должны пересекать фиктивную ось времени в тех точках, где равномерный сток за соответствующее число месяцев отвечает стоку по шкале объемов. Помня это, делаем первую попытку, назначая  $\Delta W_0 = 1,3 \text{ км}^3$  и масштаб объемов  $1 \text{ см} : 2 \text{ км}^3$ . Тогда получим тангенс угла  $3 : 6,5$ . Если же равномерный сток уменьшить до  $1,2 \text{ км}^3$ , оставляя масштаб объемов тем же, то тангенс составит  $3 : 6$  или  $1 : 2$ , что соответствует одному из обычно принимаемых на практике. Действительно, поворотом осей образовался прямоугольный треугольник, вертикальному катету которого, например  $6 \text{ см}$  (сток  $6 \cdot 2 = 12 \text{ км}^3$ ), соответствует горизонтальный катет  $3 \text{ см}$  (равномерный сток  $10 \cdot 1,2 = 12 \text{ км}^3$ ). При  $\Delta W_0 = 1,2 \text{ км}^3$  и масштабе объемов  $1 \text{ см} : 2 \text{ км}^3$  конец интегральной кривой отклонится от горизонтальной оси на  $(1,20 - 1,26) \cdot 35 \cdot 12 = -25,2 \text{ км}^3$ , или на  $12,6 \text{ см}$  вниз, что является допустимым.

#### § 4. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ КРИВЫМ НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ПОТРЕБЛЕНИЯ

Жестким называют график потребления, ординаты которого точно фиксированы на определенные календарные даты и остаются неизменными при переходе от одного года к другому. Обычно такой график расходов имеет ступенчатый вид.

Жесткий график потребления при постоянном расходе представляет наиболее простую форму водохозяйственного использования, а расчеты по нему относятся к простейшим задачам регулирования стока.

##### Расчеты регулирования на постоянный расход

При регулировании на постоянный расход предполагается, что потребители используют воду по ровному графику независимо от времени года и при переходе от одного года к другому. При появлении избытков стока над потреблением избытки вначале идут на наполнение водохранилища, а затем сбрасываются вхолостую.

Перед началом расчетов регулирования необходимо выяснить два положения. Во-первых, нужно ли регулирование вообще и, во-вторых, каковы масштабы ожидаемого регулирования. Необ-

ходимость осуществления регулирования устанавливается сравнением величин потребного (зарегулированного) расхода воды  $Q$  с минимальным средним суточным расходом реки  $Q_{\text{мин}}$ . Если  $Q > Q_{\text{мин}}$ , регулирование необходимо.

Масштабы регулирования определяются сравнением годового 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.

Для решения основных задач расчетов регулирования должен быть задан сток в виде гидрографа или в виде соответствующей интегральной кривой: при сезонном регулировании — 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 регулирования, рассмотрен в § 8. Пока же будем предполагать, что принимаемые нами графики стока (интегральные кривые) выбраны надлежащим образом с учетом как многолетних колебаний стока, так и требуемой надежности покрытия потребления.

Кроме того, в перечисленных ниже задачах при расчетах многолетнего регулирования в качестве гарантированной отдачи принимается зарегулированный расход  $Q$ , определяемый по наиболее неблагоприятному маловодью за весь многолетний период. Способ перехода к гарантированной отдаче заданной обеспеченности излагается в конце § 5.

Основные задачи расчетов регулирования стока следующие:

1) задан зарегулированный расход  $Q$ , требуется определить потребную для его поддержания полезную емкость водохранилища;

2) задана емкость водохранилища, требуется определить обеспечиваемый ею зарегулированный расход;

3) требуется установить зависимость величин  $Q$  от  $V$ .

При расчетах регулирования по интегральным кривым можно составить баланс водохранилища, определяющийся объемами поступающей и расходуемой воды.

Запас воды  $V_t$ , содержащийся в водохранилище в момент  $t$ , выразится равенством

$$V_t = V_0 + \int_{t_0}^t (Q_{\text{пр}} - Q) dt = V_0 + \int_{t_0}^t Q_{\text{пр}} dt - \int_{t_0}^t Q dt. \quad (22.5)$$

Здесь  $V_0$  — запас воды в начальный момент  $t_0$ ;  $Q_{\text{пр}}$  — расход воды, поступающей в водохранилище;  $Q$  — расход воды, отводимой из водохранилища.

Из приведенного равенства видно, что первый интеграл выражает приращение объема поступающего в водохранилище притока (по 9.5) за рассматриваемый интервал времени  $(t-t_0)$ , а второй — приращение объема расходуемой водохранилищем воды.

Если нарастание притока к водохранилищу во времени выражается интегральной кривой, то, очевидно, подобной же интегральной кривой можно выразить и нарастание расходуемой водохранилищем воды. Отсюда, согласно (22.5), разности ординат интегральных кривых притока и потребления воды будут характеризовать состояние наполнения водохранилища в каждый момент времени.

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

$$\int_{t_0}^t Q_{\text{пр}} dt = \int_{t_0}^t Q dt.$$

Тогда наполнение водохранилища в начале и конце интервала  $t-t_0$  останется одинаковым.

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 регулируемого 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 линия регулируемых 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 емкости водохранилища.

В дальнейшем исходную интегральную кривую будем называть основной; дополнительно же построенную в связи с проводимыми расчетами регулирования — контрольной.

**Сезонное регулирование.** Для решения первой задачи (по заданному расходу определить емкость водохранилища) на интегральной кривой в прямоугольных координатах за водохозяйственный расчетный маловодный год (рис. 10.5 а) проводим вправо касательную  $Aaa'$  с наклоном заданного расхода  $Q$  (по лучевому масштабу — рис. 10.5 б). Эта касательная есть не что иное как интегральная кривая зарегулированного расхода в пределах межени части года.

Так как зарегулированный расход больше естественных, ординаты новой интегральной кривой превышают, за исключением точки касания, ординаты интегральной кривой естественного стока. Следовательно, к водохранилищу притекает воды меньше, чем используется потребителями, иначе говоря, здесь имеет место дефицит стока.

Величины дефицита определяются расстоянием в масштабе шкалы объемов между интегральными кривыми зарегулированного и естественного стока, т. е. разностью их ординат, что вытекает из свойств интегральных кривых, а также из равенства (22.5). В момент времени  $c$  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  $a'v' = a'c' - v'c'$ .

Очевидно, для покрытия дефицита необходимо располагать соответствующими запасами воды в водохранилище. Эти запасы создаются в предшествующий маловодный 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 потребная полезная емкость водохранилища  $V$  для зарегулирования расхода  $Q$  в расчетном году. Чтобы обеспечить этот расход к началу межени (в точке  $A$ ), водо-

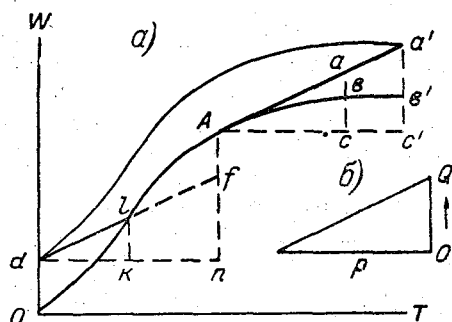


Рис. 10.5. Определение емкости водохранилища по заданному расходу и расчеты сезонного регулирования.

хранилище должно быть наполнено; сработается же водохранилище в конце межени, в точке  $a'$ . Определив полезную емкость водохранилища  $V$  и рассмотрев порядок срабатывания ее, анализируем порядок наполнения водохранилища.

Для облегчения расчетов наполнения на расстоянии, равном емкости водохранилища, проводится контрольная интегральная кривая параллельно и выше основной. Она проходит через точку  $a$ , соответствующую концу межени, когда водохранилище опорожнено, и называется, как указано, 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.

В проведенном расчете и заключается решение первой задачи.

Для решения второй задачи — определения по заданной емкости зарегулированного расхода — необходимо произвести действия, обратные тем, которые выполняются при решении первой задачи. А именно, от конца интегральной кривой вверх в соответствующем масштабе откладывается заданная емкость водохранилища  $V$  (рис. 11.5 а). Путем проведения через отложенную точку касательной к интегральной кривой и определяется обеспечиваемый данной емкостью зарегулированный расход, величина которого может быть найдена по лучевому масштабу (рис. 11.5 б). Дальнейший расчет и построения линии зарегулированных расходов на остальной части года ничем не отличаются от предыдущего (см. решение первой задачи).

При решении третьей задачи — установлении зависимости  $Q$  от  $V$  — достаточно рассмотреть только меженную часть года. Решение состоит в построениях, аналогичных второй задаче, и заключается в том, что задается ряд значений емкости водохранилища  $V_1, V_2, V_3 \dots$  и по интегральной кривой (рис. 11.5 а) и лучевому масштабу (рис. 11.5 б) определяются соответствующие

щие им зарегулированные расходы  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$ . На основании этих данных строится зависимость  $Q = f(V)$ . Крайними точками зависимости являются: точка при  $V=0$ , которой соответствует расход  $Q$ , равный минимальному естественному  $Q_{\text{мин}}$ , и точка при  $V_{\text{макс}}$ , при которой обеспечивается полное внутрigoдовое регулирование с  $Q = Q_{\text{ср}}$ . Вид подобной зависимости изображен на рис. 11.5 в.

Совершенно одинаково рассмотренные задачи решаются и по интегральным кривым в косоугольных координатах.

В рассмотренном примере расчета регулирования контрольная интегральная кривая строилась выше основной. В данном случае она служила интегральной кривой опорожненного водохранилища, а основная — наполненного. Тогда расстояния между ос-

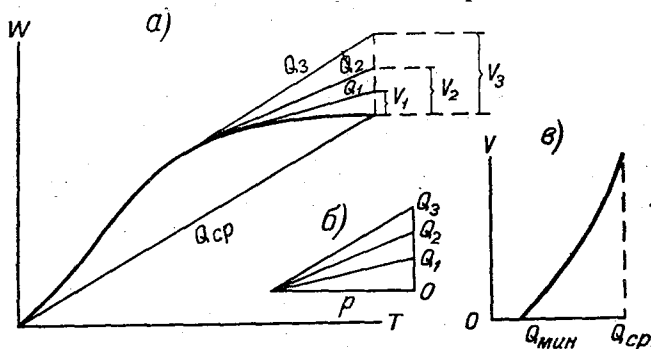


Рис. 11.5. Определение расхода по заданной емкости при сезонном регулировании и зависимость зарегулированных расходов от емкости водохранилища.

новой интегральной кривой и линией зарегулированного расхода  $ав, а'в'$  и т. д. (см. рис. 10.5) выражают величины сработки водохранилища. Между тем при расчетах регулирования больший интерес представляют имеющиеся запасы воды в водохранилище, т. е. разности между емкостью и сработкой ( $V - ав, V - а'в'$  и т. д.). Чтобы непосредственно из построений получать содержащиеся в водохранилище запасы воды (иначе говоря, наполнения 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 практически не меняется по сравнению с изложенным.

Так, для решения первой задачи (по заданному расходу определить емкость водохранилища) линию под углом заданного расхода следует проводить снизу основной интегральной кривой (хо-

дом 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 и далее 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 в каждом году различным емкостям обычным путем строится кривая обеспеченности. Потребная для зарегулирования в рас-

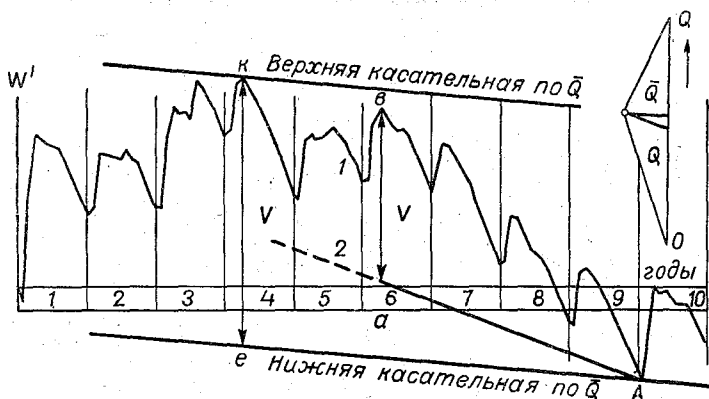


Рис. 12.5. Определение емкости водохранилища по заданному расходу при многолетнем регулировании. Интегральные кривые естественного (1) и зарегулированного (2) стока.

четном 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  $Q$ .

**Многолетнее регулирование.** Поскольку целью многолетнего регулирования является сглаживание многолетних колебаний стока, при расчетах этого вида регулирования рассматривают не отдельные водохозяйственные годы, как это имело место в случае сезонного регулирования, а гидрологические ряды достаточно большой длительности.

Для решения тех же основных задач расчетов при многолетнем регулировании прежде всего необходимо на интегральной кривой за длительный ряд отыскать наиболее маловодный пе-

риод. На рис. 12.5 такой период составляют годы 7—9 или, возможно, более длительный период — годы с 4 по 9, если глубина многолетнего регулирования будет очень большой.

Первая задача (по заданному расходу определить емкость) решается путем проведения касательной  $Aa$  к интегральной кривой в конце маловодья ходом назад с наклоном заданного расхода  $Q$  (рис. 12.5). Наибольшее расстояние  $ab$  между проведенной касательной и интегральной кривой в пределах маловодья и определит потребную для осуществления многолетнего регулирования емкость водохранилища  $V$  по заданному расходу  $Q$ .

Выполненным расчетом охвачен период срабатывания водохранилища. При данном расходе  $Q$  в сработку вовлечены маловодные годы 7—9 и межень предшествующего им 6-го года. Очевидно, при значительно большей величине зарегулированного расхода  $Q$  сработка водохранилища может начаться раньше, так как и 4-й год является очень маловодным, несмотря на то, что маловодное трехлетие (7—9 годы) отделено от 4-го года двумя годами повышенной водности (5 и 6 годы).

Определив таким образом полезную емкость водохранилища  $V$ , проводят расчеты регулирования по остальным годам имеющегося ряда, для чего строят контрольную<sup>1</sup> интегральную кривую (см. рис. 15.5  $a$ ), как указано ранее. В первую очередь выполняется расчет по периоду, следующему за полной сработкой водохранилища, т. е. от точки  $A$  вправо. Этот период (в нашем случае один год) характеризуется повышенным суммарным притоком по сравнению с зарегулированным расходом  $Q$ , следовательно, в течение него будет происходить восстановление ранее израсходованных запасов воды — наполнение водохранилища.

Линия  $aA$  зарегулированного расхода  $Q$  продолжается (вправо) до пересечения с контрольной интегральной кривой или до конца ряда, если такого пересечения не происходит.

Встреча линии зарегулированного расхода с контрольной интегральной кривой означает, что водохранилище в этой точке наполнилось. Далее (пока расходы притока больше зарегулированных) линия зарегулированных расходов совпадает с контрольной интегральной кривой, а затем отклоняется от нее, когда расходы притока становятся меньше зарегулированного  $Q$ . Отрезок времени, в течение которого линия зарегулированных расходов совпадает с контрольной интегральной кривой, характеризуется работой водохранилища при постоянном уровне на отметке НПГ, и расходы зарегулированные равны приточным (естественным). В остальное время, пока происходит срабатывание (основ-

<sup>1</sup> Необходимо отметить, что при практических расчетах контрольные интегральные кривые строятся лишь на тех участках чертежа, где ожидаемые наполнения водохранилища близки к полному.

ная интегральная кривая и линия зарегулированного расхода сближаются) или наполнение водохранилища (основная интегральная кривая и линия зарегулированного расхода удаляется друг от друга), уровень водохранилища находится на отметках ниже НПГ.

После полной сработки в точке  $A$ , водохранилище к концу гидрологического ряда (в конце 10-го водохозяйственного года) оказалось наполненным на величину  $cd$ . Чтобы не нарушать баланса стока в течение всего гидрологического ряда, т. е. чтобы суммарный зарегулированный сток остался равным естественному, необходимо иметь такие же запасы воды  $cd$  и в начале ряда (рис. 15.5  $a$ ).

Отложив эти запасы воды вниз от основной интегральной кривой в начале ряда, продолжим аналогичный расчет ходом вперед до смыкания с точкой  $a$ . В этой точке определились размеры полезной емкости водохранилища, а вправо от нее уже выполнены расчеты регулирования.

Указанный расчет от начала гидрологического ряда до точки  $a$  начинается с проведения через точку  $d$  (рис. 15.5  $a$ ) заданного расхода  $Q$  до пересечения с контрольной интегральной кривой. В пределах участка, на котором  $Q_{пр} > Q$ , линия зарегулированных расходов идет по контрольной интегральной кривой, а далее (при  $Q_{пр} < Q$ ) отклоняется от нее.

Так продолжается расчет, пока не будет получена непрерывная линия зарегулированных расходов 2 (рис. 15.5  $a$ ). Она состоит из отрезков прямой с наклоном, соответствующим заданному расходу  $Q$ , и участков кривых, параллельных основной интегральной кривой, в пределах которых водохранилище работает по притоку при заполненной доверху емкости.

Решение второй задачи также начинается с рассмотрения отобранного маловодья. На расстоянии, равном заданной емкости  $V$ , вниз от основной кривой строится контрольная интегральная кривая (рис. 15.5  $a$ ). В полосе между основной и контрольной интегральными кривыми проводится прямая  $Aa$ , которая является касательной к основной интегральной кривой в конце маловодья (в точке  $A$ ) и к контрольной интегральной кривой в начале маловодья (точка  $a$ ). Наклоном этой касательной и определится величина искомого зарегулированного расхода  $Q$ . Определив указанным путем величину зарегулированного расхода, проводят расчет регулирования на остальных участках интегральной кривой. Эти расчеты ведутся в той же последовательности, как и при решении первой задачи.

Третью задачу проще и удобнее решать как и первую задачу. Для этого надо задать рядом значений расходов  $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$  и по интегральной кривой определить потребные для их зарегулирования емкости водохранилища  $V_1, V_2, V_3 \dots$ . По полученным данным строится кривая  $Q=f(V)$ , которая является продолже-

нием аналогичной кривой при сезонном регулировании стока (рис. 11.5 в).

Если при сезонном регулировании верхним пределом зависимости  $Q=f(V)$  является средний годовой расход расчетного маловодного года  $Q_{ср}$ , то при многолетнем регулировании им является средний многолетний годовой расход  $\bar{Q}$ . К расходу  $\bar{Q}$  искомая зависимость приближается асимптотически, что свидетельствует о малом влиянии увеличения емкости водохранилища на зарегулированный расход при приближении последнего к  $\bar{Q}$ . Характер зависимости  $Q=f(V)$ , при котором одному и тому же приращению емкости в нижней части ее отвечают большие приращения зарегулированных расходов, а в верхней части — меньшие, объясняется влиянием длительности периода сработки водохранилища. С ростом емкости  $V$  увеличивается период сработки  $T$ , в связи с чем понижается относительный эффект увеличения емкости водохранилища  $\Delta V$ , так как величина  $\Delta Q$  обратно пропорциональна длительности периода сработки  $T$ , в пределе стремящегося к бесконечности

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{T \rightarrow \infty}.$$

Для имеющегося многолетнего периода верхним пределом емкости водохранилища, обеспечивающей наивысшую степень регулирования стока до среднего расхода за этот период, является такая емкость, которая в состоянии осуществить полное перераспределение стока за данный период. Емкость должна иметь возможность не только создать запасы воды, обеспечивающие покрытие дефицита за длительное маловодье, но и обеспечить аккумуляцию избытков стока за наиболее многоводную часть периода.

Величина емкости водохранилища, обеспечивающая полное перераспределение стока, определится по вертикальному расстоянию  $ke$  в масштабе объемов между верхней и нижней касательными к интегральной кривой (рис. 12.5), проведенными с наклоном среднего многолетнего расхода за этот период.

Необходимо иметь в виду, что в границах сезонного регулирования, т. е. в зоне  $Q < Q_{ср}$ , рассмотренная выше зависимость  $Q=f(V)$  иногда обращается в прямую, если с глубиной регулирования не меняется длительность периода сработки водохранилища. Такое положение обуславливается особенностью внутригодового распределения стока и характерно для некоторых рек с весенним половодьем, у которых большое и сосредоточенное половодье сменяется низкой и растянутой меженью (Казахстанский и Восточноевропейский подтипы режима расходов по классификации Б. Д. Зайкова).

## Расчеты регулирования на ступенчатый график расходов

Расчеты регулирования по интегральным кривым на жестко заданный ступенчатый график расходов ведутся совершенно одинаково и в той же последовательности, как это было показано для случаев регулирования на постоянный расход.

Например, рассмотрим определение полезной емкости водохранилища при двухступенчатом графике, который может иметь место при транспортно-энергетическом регулировании, когда для поддержания судоходных условий в нижнем бьефе подпорного

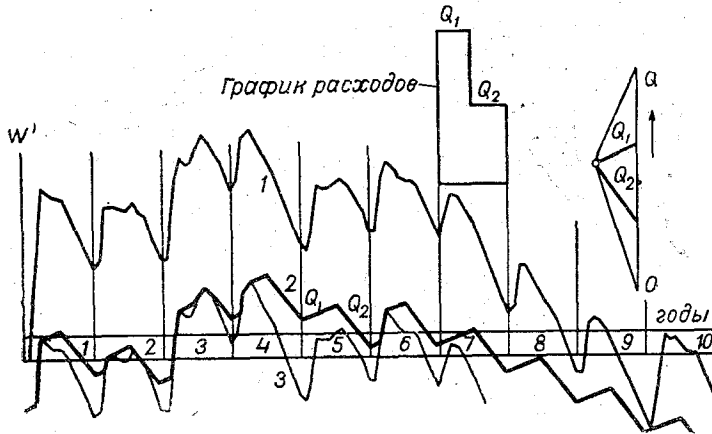


Рис. 13.5. Расчеты многолетнего регулирования на двухступенчатый график расходов.

Интегральные кривые естественного (1), зарегулированного (2) стока и контрольная (3).

сооружения в навигационное время требуется один расход  $Q_1$ , а в зимнее время в основном для энергетики другой расход  $Q_2$ . В этом случае 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 навигационного времени. При сезонном регулировании построение ломаной линии с расходами  $Q_2$  и  $Q_1$  ведется в пределах 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. 13.5).

Потребная емкость водохранилища для осуществления регулирования по заданному двухступенчатому графику определится, как обычно, по наибольшему отклонению линии зарегулирован-



ных расходов от основной интегральной кривой в пределах лимитирующего маловодья.

Определив размеры полезной емкости водохранилища, строят контрольную интегральную кривую и далее продолжают расчет с теми же расходами  $Q_1$  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.

Для соблюдения баланса стока, как и во всех подобных случаях, необходимо запасы воды в водохранилище, имеющиеся в конце гидрологического ряда, принять и на начало ряда (см. рассмотренный выше расчет многолетнего регулирования на постоянный расход — рис. 15.5 а).

В результате проведения непрерывной линии зарегулированных расходов  $Q_1$  и  $Q_2$ , а при наполненном водохранилище — естественных расходов получается интегральная кривая зарегулированного стока. Расчет регулирования на этом заканчивается.

Если необходимо выполнять расчет сезонного регулирования по заданному графику и в другие годы, кроме маловодного, по которому определена величина полезной емкости водохранилища, поступают следующим образом.

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

Для решения обратной задачи — определения по заданной емкости величины зарегулированных расходов — обязательно должен быть также задан и один из расходов  $Q_1$  или  $Q_2$ , иначе задача становится неразрешимой. Тогда первоначально определяют среднюю величину зарегулированного расхода путем проведения касательной к концу маловодья основной интегральной кривой и к началу маловодья — контрольной. 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 другой расход —  $Q_2$  или  $Q_1$ .

Подобным образом выполняются расчеты регулирования и при более сложном жестком графике — при трех, четырех и т. д. ступенях расходов.

## Характеристики режима работы водохранилища

Расчеты регулирования обычно сопровождаются построением графиков, характеризующих режим работы водохранилища. К последним, в частности, относятся графики хода наполнения — срабатывания водохранилища и зарегулированных расходов. Кроме того, для наглядности представления о влиянии водохранилища на режим естественного стока на график зарегулированных расходов наносятся и естественные расходы.

Совмещение графиков естественных и зарегулированных расходов на одном чертеже дает также возможность контроля правильности выполненных расчетов регулирования. Контроль состоит в сравнении площадей графиков естественных и зарегулированных расходов. При этом в интервале времени, где график естественных расходов выше графика зарегулированных расходов, разность их площадей должна отвечать соответствующему увеличению наполнения водохранилища. В интервале же, где график естественных расходов ниже зарегулированного, наоборот, разность площадей должна отвечать соответствующему уменьшению наполнения водохранилища. При несоответствии разности площадей графиков естественных и зарегулированных расходов с объемами наполнения или сброски водохранилища имеет место ошибка в расчетах регулирования, которую надлежит исправить.

На рис. 14.5 на конкретном гидрологическом материале проведен расчет и показаны графики режима работы водохранилища сезонного регулирования.

При неглубоком сезонном регулировании (левые графики), т. е. когда объем годового потребления  $W$  значительно меньше годового стока  $W_p$ , на графике хода наполнения — срабатывания водохранилища имеется горизонтальная площадка на уровне наполненного водохранилища, свидетельствующая о более или менее длительной работе водохранилища на приточных расходах со сбросами. Соотношения между естественными и зарегулированными расходами для этого случая видны из нижнего рисунка.

При глубоком сезонном регулировании (правые графики), при  $W = W_p$ , горизонтальная площадка на графике наполнения — срабатывания водохранилища практически отсутствует, так как после заполнения емкости водохранилище сразу же начинает срабатываться и сбросы отсутствуют.

Графики наполнения — срабатывания водохранилища и зарегулированных расходов в сопоставлении с естественными при многолетнем регулировании помещены на рис. 15.5 (б и в). На этом же рисунке (а) показан и расчет регулирования, выполненный на конкретном гидрологическом материале. На графике б видно, что в течение 10-летнего периода водохранилище срабатывается до горизонта мертвого объема только один раз, а наполняется до

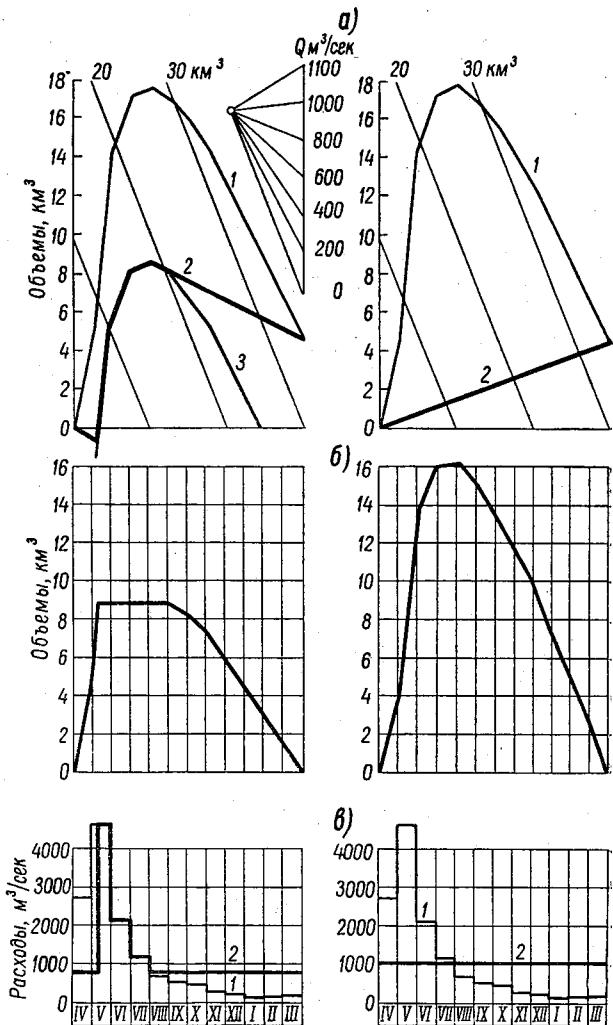


Рис. 14.5. Расчеты сезонного регулирования на постоянный расход.

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

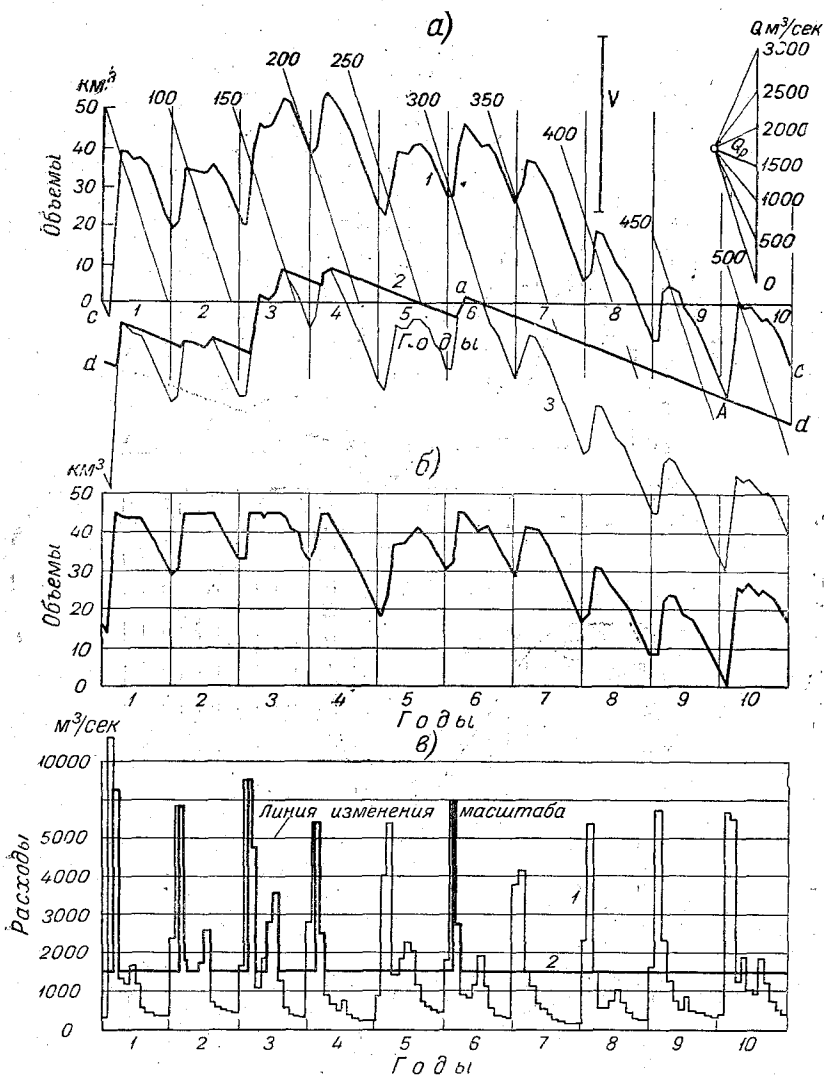


Рис. 15.5. Расчет многолетнего регулирования на постоянный расход. а — интегральные кривые естественного (1), зарегулированного (2) стока и контрольная (3); б — график наполнений водохранилища, в — графики естественных (1) и зарегулированных (2) расходов.

НПГ в пяти годах. В соответствующем взаимоотношении находятся естественные и зарегулированные расходы (см. график *в*).

Отметим, что данные для построения графиков режима работы водохранилища берутся непосредственно с интегральных кривых (см. рис. 14.5 и 15.5). Наполнения водохранилища на соответствующие даты находятся по вертикальному расстоянию в масштабе объемов между интегральными кривыми опорожненного водохранилища (в нашем случае — основная интегральная кривая) и зарегулированных расходов. Зарегулированные же расходы определяются по лучевому масштабу или аналитически, исходя из уравнения баланса (23.5), а на участках, где интегральные кривые параллельны, т. е. когда зарегулированные расходы равны естественным, принимаются по таблице подсчета интегральной кривой.

#### § 5. ТАБЛИЧНЫЙ СПОСОБ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА — РАСЧЕТ БАЛАНСА ВОДОХРАНИЛИЩА

Наряду с графическими методами применяется табличный способ расчета регулирования стока, который сводится к решению уравнения баланса водохранилища. Для интервала времени  $\Delta t$  уравнение баланса имеет вид

$$\pm \Delta V = Q_a \Delta t = (Q_{пр} - Q) \Delta t = [Q_{пр} - (Q_n + Q_c + Q_p)] \Delta t, \quad (23.5)$$

где  $\Delta V$  — изменение наполнения водохранилища (аккумуляция). Знак плюс соответствует увеличению наполнения водохранилища, знак минус — уменьшению (сработке);  $Q_a$  — расход аккумуляции, т. е. разность расходов притекающего в водохранилище  $Q_{пр}$  и зарегулированного брутто  $Q$ ;  $Q_n$  — используемый расход;  $Q_c$  — расход холостых сбросов;  $Q_p$  — суммарный расход потерь и отъемов воды из водохранилища.

В зависимости от требуемой точности и подробности расчет ведется по различным интервалам времени  $\Delta t$ : пятидневкам, декадам или месяцам. Соответственно этому основными расчетными величинами будут: средние пятидневные, средние декадные или средние месячные расходы. Можно вести расчеты и по более мелким (сутки) или по более крупным интервалам (сезоны, годы).

Расчеты регулирования стока рекомендуется вести по форме табл. 2.5.

Последовательность расчета остается той же, что и при графических расчетах. Решая, например, задачу определения емкости водохранилища по заданному расходу, расчет ведется ходом назад:

а) при сезонном регулировании с конца расчетного маловодного года и

Таблица 2.5

№ п/п	Дата (расчетный интервал)	Расходы, м <sup>3</sup> /сек			Объемы, км <sup>3</sup>		
		притока (естественные)	зарегулированные (брутто)	аккумуляции	наполнения водохранилища		
					на конец интервала	на середину интервала	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	IV-II	2352	2352	0	0	5,60	5,60
2	V-I	6471	3385	3086	2,66	8,26	6,93
3	2	2726	4416	1310	1,13	9,39	8,83
4	3	5350	5350	0	0	9,39	9,39
·	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Горизонты верхнего бьефа, м		Площадь зеркала на середину интервала, км <sup>2</sup>	Расходы, м <sup>3</sup> /сек			
на конец интервала	на середину интервала		потерь и отъемов	сбросов (холодных)	сумма потерь, сбросов и т. п.	зарегулированные (нетто)
9	10	11	12	13	14	15
110,00						
110,00	110,00	808	35	0	35	2317
112,96	111,59	909	35	0	35	3350
114,00	113,47	1065	35	1181	1216	3200
114,00	114,00	1118	35	2115	2150	3200
.....	.....	.....	..	.....	.....	.....

б) при многолетнем регулировании — с конца наиболее неблагоприятного маловодного периода.

Вписав в графу 3 расходы притока в водохранилище (естественные расходы стока или учитывающие регулирование другими водохранилищами), а в графу 4 заданный зарегулированный расход брутто (или несколько расходов), последовательно определяют разности (расходы аккумуляции), записываемые затем в графу 5. Умножением этих разностей на соответствующий интервал времени  $\Delta t$  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 полезная емкость водохранилища.

Определив размеры полезной емкости водохранилища, продолжают расчет ходом вперед:

а) при сезонном регулировании — 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.

Далее проводится расчет от начала рассматриваемого периода до начала сработки в течение 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 (гр. 15), для чего необходимо вычислить потери и отъемы (гр. 12), холостые сбросы (гр. 13) и т. п. Потери вычисляются или как средние в пределах каждого интервала  $\Delta t$ , или как средние за многолетний период. В первом случае потери находятся при наполнении водохранилища, равном среднему за  $\Delta t$  (гр. 8), а во втором — среднему за весь период.

При значительных изменениях во времени потерь и отъемов зарегулированные расходы нетто могут колебаться от интервала к интервалу в больших пределах. Поэтому при необходимости иметь выравненный расход нетто выполненный расчет следует откорректировать, сделав постоянным зарегулированный расход нетто, для чего вводится дополнительная графа 16. Зарегулированный расход брутто при этом соответственно изменится; также изменится и ход наполнения и сработки водохранилища.

\* \* \*

В рассмотренных выше задачах расчетов многолетнего регулирования (§ 4 и 5) найденный по наиболее неблагоприятному маловодному периоду зарегулированный расход  $Q$  принимался в качестве гарантированной отдачи. Тем самым мы как бы считали, что установка работает бесперебойно в течение рассматриваемого периода, т. е. что гарантированная отдача обеспечивается в течение всего периода на 100%. С народнохозяйственной точки зрения, как было показано в гл. 2, § 7, такая обеспеченность не находит оправдания. Поэтому гарантированная отдача проектируется с меньшей обеспеченностью чем 100% (см. также гл. 6, 7 и др.).

Чтобы по календарному гидрологическому ряду выполнить расчет при наперед заданной обеспеченности гарантированной отдачи, календарный ряд должен быть достаточно длинным (см. ниже, § 8). В составе такого ряда выделяется определенное число перебойных лет, т. е. лет со сниженной отдачей по сравнению с гарантированной величиной (см. гл. 6, § 7). Например, при обеспеченности 95% и длительности ряда 60 лет

число перебойных лет равно 3. За счет более низкой отдачи в перебойные годы несколько повышается гарантированная отдача 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  $Q$  (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

$$Q_p = \frac{QT - 0,7Qt}{T - t}, \quad (24.5)$$

где  $T$  — длительность маловодного периода, определившего  $Q$ ;  $t$  — длительность периода со сниженной отдачей до величины  $0,7 Q$ .

#### § 6. ПРИМЕНЕНИЕ КРИВЫХ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАСХОДОВ К РЕШЕНИЮ ПРОСТЕЙШИХ ЗАДАЧ СЕЗОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

Простейшие задачи сезонного регулирования стока могут быть решены также и с помощью кривых продолжительности расходов.

Метод расчетов сезонного регулирования стока, основанный на применении кривых продолжительности расходов, разработан в ГГИ В. Г. Андреевым [5]. Основные положения метода заключаются в установлении при помощи кривой продолжительности суточных расходов расчетного маловодного года величины зарегулированного расхода по заданной полезной емкости водохранилища, или, наоборот, в установлении по заданному расходу необходимой емкости.

Применение метода ограничивается следующими условиями:

- а) наличием только сезонного регулирования;
- б) зарегулированным расходом, принимаемым постоянным в течение года;
- в) отсутствием значительного второго пика (летнего или осеннего) паводка.

Процесс работы водохранилища принимается в следующем виде. Водоохранилище начинает наполняться при расходах реки, превышающих зарегулированный. После заполнения водохранилища пропускаются приточные расходы, если они превышают зарегулированный. При снижении приточных расходов ниже зарегулированного происходит сработка водохранилища. При таком режиме регулирования в годы с пониженной водностью по сравнению с расчетной водохранилище сработается раньше окон-



чания межени и далее наступит перебой. В годы же с водностью выше расчетной водохранилище полностью не сработается, и это приведет к дополнительным сбросам в следующем водохозяйственном году.

Возможность применения для расчетов сезонного регулирования кривой продолжительности расходов вместо гидрографа или интегральной кривой доказывается следующими соображениями.

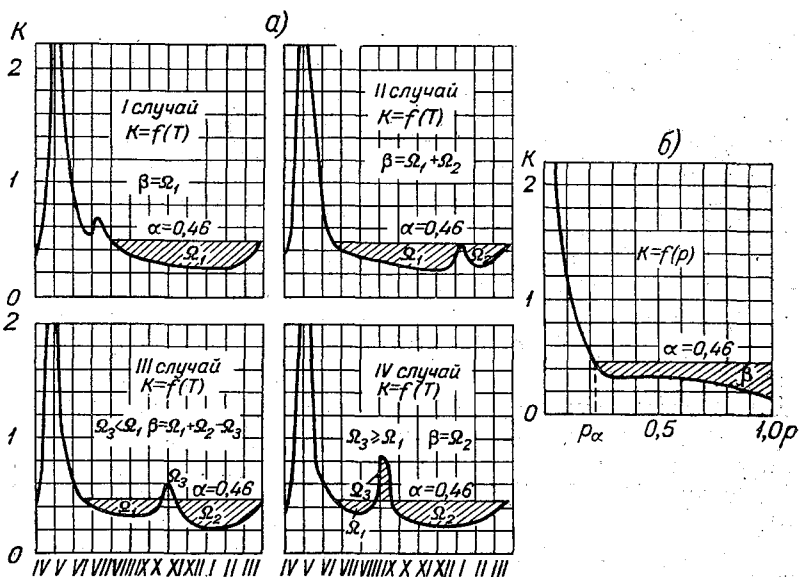


Рис. 16.5. Различные формы гидрографов (а) и отвечающая им кривая продолжительности расходов (б).

На рис. 16.5 представлено четыре гидрографа, которым соответствует одна и та же кривая продолжительности расходов для реки с преобладанием снегового питания. Гидрографы и кривая продолжительности построены в модульных коэффициентах  $K = \frac{Q}{\bar{Q}}$  (здесь  $\bar{Q}$  — средний многолетний годовой расход), а продолжительность взята в долях от единицы. Для того чтобы вести расчеты по этим гидрографам и кривой продолжительности, зарегулированный расход  $Q_{зар}$  и емкость водохранилища  $V$  должны быть выражены также в относительных величинах: расход  $\alpha = \frac{Q_{зар}}{\bar{Q}}$  и емкость  $\beta = \frac{V}{\bar{W}}$  (здесь  $\bar{W} = \bar{Q} \cdot 31,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$  — средний многолетний годовой сток).

Величина полезной емкости водохранилища  $\beta$  при заданном расходе  $\alpha$  определяется на рис. 16.5 площадью дефицита стока, т. е. площадью, ограниченной линией  $\alpha$  и гидрографом или линией  $\alpha$  и кривой продолжительности в зоне  $K < \alpha$ .

Случай I отвечает отсутствию летне-осеннего паводка или когда пик этого паводка не превышает  $\alpha$ . В этом случае на гидрографе получается одна площадь дефицита  $\Omega_1$ .

Случай II отвечает наличию летне-осеннего паводка с величиной пика, равной  $\alpha$ . Емкость  $\beta = \Omega_1 + \Omega_2$ .

Случай III отличается от II тем, что пик летне-осеннего паводка превышает  $\alpha$ . Емкость  $\beta = \Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3$ , так как избыток воды  $K - \alpha$  в пределах паводка ( $\Omega_3$ ) идет на частичное восстановление израсходованных запасов воды в водохранилище.

Случай IV характеризуется большим летне-осенним паводком, которым полностью восстанавливаются сработанные запасы воды в предшествующее время  $\Omega_1$ , т. е.  $\Omega_3 \geq \Omega_1$ . Здесь регулирование как-бы имеет два цикла с соответствующими значениями  $\beta_1 = \Omega_1$  и  $\beta_2 = \Omega_2$ , причем в нашем примере  $\Omega_2 > \Omega_1$ , а следовательно  $\Omega_2$  и определит величину полезной емкости водохранилища  $\beta$ . Конечно, можно представить себе и другое соотношение между  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ , когда  $\Omega_1 > \Omega_2$ . В этом случае величина емкости  $\beta = \Omega_1$ .

Для рассмотренных случаев при  $\alpha = 0,46$  В. Г. Андрияновым получены следующие значения емкости водохранилища  $\beta$ : по кривой продолжительности — 0,118; по гидрографам для случая I — 0,118, случая II — 0,115, случая III — 0,104 и для случая IV — 0,081.

Приведенное показывает, что для случаев I и II результаты расчетов по кривой продолжительности совпадают с результатами расчетов по гидрографам; для случая III получается небольшой запас (13%), а для случая IV — результат расчета по кривой продолжительности не приемлем.

Расчет полезной емкости водохранилища  $\beta$  по кривой продолжительности (рис. 17.5 а) по заданному расходу  $\alpha$  и решение обработанной задачи облегчается с помощью интегральной кривой площадей графика продолжительности. Эта кривая, обозначенная  $\varphi(K)$  и представленная на рис. 17.5 б (от  $K=0$ ), получается последовательным едимерованием площадей полосок высотой  $\Delta K$ , ограниченных слева осью ординат и справа кривой продолжительности. На рис. 17.5 б проведена также прямая  $\varphi=K$ , дающая нарастание с величиной  $K$  площади прямоугольника с основанием  $p=1$ . Очевидно, разность абсцисс  $\varphi=K$  и  $\varphi(K)$  отвечает дефициту стока при том или ином значении  $K=\alpha$ , т. е. емкости водохранилища  $\beta$ . По этим разностям строится кривая  $\beta(\alpha)$ , которой и пользуются для определения  $\alpha$  по заданной емкости  $\beta$  и, наоборот, для определения  $\beta$  по заданному  $\alpha$ .

Аналитическое выражение полезной емкости водохранилища может быть дано в следующем виде (рис. 17.5 а):

$$\beta = \int_{p_\alpha}^1 (\alpha - K) dp = \alpha (1 - p_\alpha) - \int_{p_\alpha}^1 K dp = \alpha - \left[ \int_{p_\alpha}^1 K dp + \alpha p_\alpha \right] = \alpha - \varphi(\alpha). \quad (25.5)$$

Здесь  $p_\alpha$  — обеспеченность расхода  $\alpha$  по кривой продолжительности расходов;  $\varphi(\alpha)$  — площадь, ограниченная осями координат, кривой продолжительности и расходом  $\alpha$  (на рис. 17.5 а в точках).

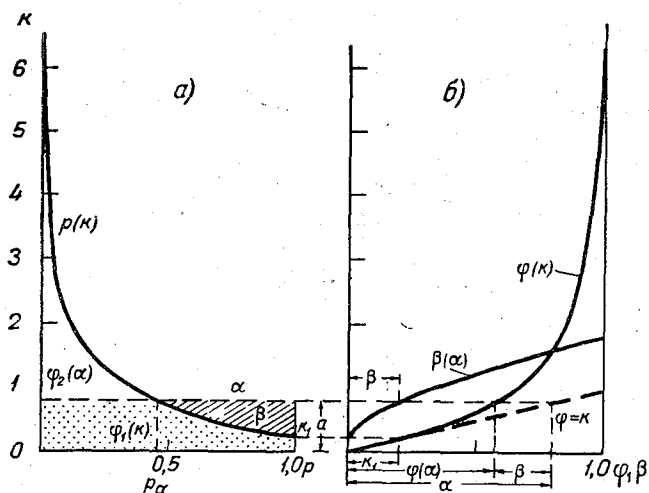


Рис. 17.5. Кривая продолжительности суточных расходов  $r(K)$  (а) и интегральные кривые (б)  $\varphi(K)$  и дефицитов (емкости)  $\beta(\alpha)$ .

Кривой продолжительности суточных расходов и интегральными кривыми  $\varphi(K)$  и дефицита (емкости)  $\beta(\alpha)$ , построенными для маловодного года с заданной обеспеченностью  $p$ , можно пользоваться для решения аналогичных задач по маловодным годам другой обеспеченности. Для этого кривые  $K(p)$ ,  $\varphi(K)$  и  $\beta(\alpha)$  года с обеспеченностью  $p$  перестраиваются в масштабе расходов не по отношению к среднему многолетнему годовому расходу, а к среднему расходу данного года, т. е. в масштабе  $\frac{K}{m_i}$ , где  $m_i$  — величина модульного коэффициента года с обеспеченностью  $p_i$ .

Переход от данных, получаемых по часовым кривым, к данным, выраженным относительно среднего многолетнего расхода (в обычных модульных коэффициентах  $K$ ), осуществляется путем введения коэффициента, равного  $m_i$ .

Указанный прием использования кривых  $K(p)$ ,  $\varphi(K)$  и  $\beta(\alpha)$  года с обеспеченностью  $p$  для расчетов регулирования стока в другие маловодные годы основан на предположении о синхронности хода межлетнего стока в рассматриваемые годы. При отсутствии такой синхронности этот прием использовать нельзя.

## § 7. ОСОБЕННОСТИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ НА ВОДОТОКАХ С ОЗЕРНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Если под водохранилище намечается 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 отобразено влияние регулирования озером в современных (естественных) условиях, и, следовательно, при водохозяйственных расчетах по этим расходам было бы дважды учтено регулирующее влияние озера.

Расходы притока могут быть получены:

- а) по сумме расходов впадающих в озеро притоков, включая сток с водосбора, не учтенного притоками, и
- б) по расходам стока основного водотока в створе, где намечается постройка подпорных сооружений, с исключением расходов аккумуляции в озерном водоеме в современных условиях.

Следует отметить, что при первом способе получаются величины притока брутто, и поэтому при водохозяйственных расчетах из них следует исключать величины испарения с водного зеркала (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 вводить лишь с дополнительной площади затопления.

Первый способ получения расходов притока при наличии достаточных данных (что к сожалению имеет место далеко не всегда) понятен и пояснений не требует. Поэтому остановимся на определении расходов притока вторым способом.

На рис. 18.5 изображен график хода уровней водоема. За интервал времени  $\Delta t_{1-2}$  уровень повысился на  $\Delta H_{1-2}$ . Это повышение уровня вызвано задержанием части притока, поступившего в водоем, отчего сток из водоема оказался меньше притока в него. За интервал же времени  $\Delta t_{3-4}$ , наоборот, уровень понизился на  $\Delta H_{3-4}$  и, следовательно, часть ранее накопленного

объема воды сработалась, отчего сток из водоема стал больше, чем приток в него.

Указанное задержание части притока обуславливается недостаточной пропускной способностью истока, не обеспечивающей на подъеме половодья при данных уровнях водоема пропуск в реку всего расхода притока. На спаде половодья пропускная способность истока, при достигнутых на подъеме уровнях оказывается больше притока, что и обуславливает сработку водоема.

Объем воды, задержанной в водоеме или сработанной из него, т. е. объем положительной или отрицательной аккумуляции, равен разности между объемами притока и стока

$$\Delta W = \Delta W_{\text{пр}} - \Delta W_{\text{ст}} = (Q_{\text{пр}} - Q_{\text{ст}}) \Delta t. \quad (26.5)$$

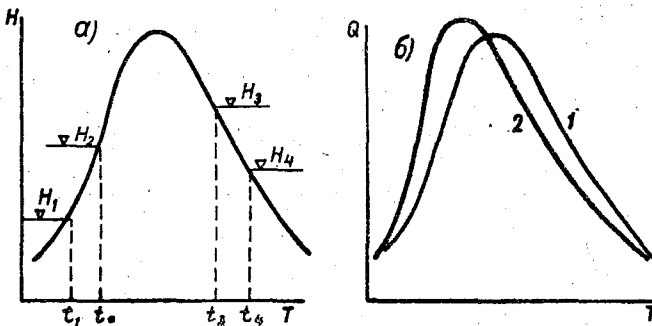


Рис. 18.5. Графики уровней озерного водоема (а) и гидрографы стока и притока (б).  
1 — сток, 2 — приток.

Объем  $\Delta W$ , получающийся по балансу стока, размещается в призме водоема между соответствующими уровнями  $H_1$  и  $H_2$ ,  $H_3$  и  $H_4$  и т. п.

Следовательно,

$$\Delta W \Delta V = \Delta H F_{\text{ср}}, \quad (27.5)$$

где  $F_{\text{ср}}$  — площадь зеркала на уровне

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

Учитывая (26.5) и (27.5) и принимая во внимание, что задача настоящего расчета сводится к нахождению  $Q_{\text{пр}}$ , можно написать

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ст}} \pm \frac{\Delta V}{\Delta t}. \quad (28.5)$$

Знак плюс отвечает подъему уровня, знак минус — спаду уровня водоема. Форма гидрографа притока более острая по сравнению с гидрографом стока (рис. 18.5 б).

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

Если наблюдения велись на нескольких водомерных постах, расположенных в различных частях водоема, данные об уровнях следует брать как среднее арифметическое из показаний всех постов. Это необходимо для исключения ветровых сгонно-нагонных изменений уровней.

Подсчет расходов притока ведется в форме табл. 3.5.

Таблица 3.5

№ п/п	Дата (расчетный интервал)	$Q_{ст}$ $м^3/сек$	$H$		$\Delta H$ м	$F_{ср}$ $км^2$	$\Delta V$ $м^3$	$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ $м^3/сек$	$Q_{пр}$ $м^3/сек$
			на конец интерва- ла	на сере- дину интерва- ла					
1	IV	857	1,06						
2	V	1970	1,19	1,12	0,13	1950	254	98	955
3	VI	1400	1,77	1,48	0,58	2090	1215	462	2432
3	VI	1400	2,67	2,22	0,90	2350	2120	806	2206
.	..	....	....	....	....	....	....	....	....

## § 8. ВЫБОР РАСЧЕТНОГО ПЕРИОДА И РАСЧЕТНЫХ ЛЕТ

В зависимости от глубины намечаемого регулирования и стадии проектирования расчеты выполняются или по календарному периоду, состоящему из ряда лет, или по отдельным характерным годам.

Если говорить о сезонном регулировании стока, то на предварительных стадиях проектирования расчеты допускается вести по отдельным характерным годам. На завершающих стадиях водохозяйственного проектирования или для окончательно принятых вариантов на предварительных стадиях проектирования расчеты сезонного регулирования необходимо выполнять по календарному периоду. Здесь под термином «период» понимается весь имеющийся гидрологический ряд или (в случае большой длительности его) выбранный из него расчетный период.

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

В качестве расчетных принимаются годы (водохозяйственные): а) маловодный с расчетной обеспеченностью  $p$ ; б) близкий к среднему; в) многоводный с обеспеченностью  $p'=1-p$ .

Указанные годы выбираются из имеющегося гидрологического ряда по признакам общей водности, пользуясь для этого

кривой обеспеченности годового стока и внутригодового распределения стока, используя для этого развернутые гидрологические характеристики, представленные, например, в форме табл. 1.4. 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 срабатывает 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. На основе такой обработки находятся статистические параметры меженного стока и строится кривая обеспеченности, по которой из числа лет гидрологического ряда отыскивается год с меженным стоком, близким к расчетному при заданном  $p$ . Задачей дальнейшего анализа является отобрать в имеющемся ряду такой реальный год, в котором сток межени и годового периода, по возможности, отвечали бы заданной обеспеченности  $p$ . Иногда не удается отыскать подходящий год, особенно при ограниченной длительности ряда. Тогда берется год, близкий к нему по величине стока межени, и делается приводка к расчетному стоку межени, взятому с кривой обеспеченности при заданном  $p$  (путем перемножения расходов данного года на отношение стока расчетного к фактическому). Этой приводкой, однако, достигается соответствие только меженного стока расчетному, а годовой сток может остаться несколько неувязанным, чем обычно пренебрегают.

Расчетный календарный период также выбирается на основе анализа всего гидрологического ряда.

Выбранный период должен удовлетворять следующим требованиям:

- а) по общей водности он должен быть близким к норме;
- б) в состав его должны входить годы различной водности и 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 (многолетнего).

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

В. Г. Андреев, исследовавший этот вопрос [6], рекомендует

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

Для окончательной проверки репрезентативности выделенного расчетного периода следует на теоретическую кривую обеспеченности, построенную по параметрам длинного ряда, нанести точки за годы расчетного периода по обеспеченности в длинном ряду. Эмпирические точки за годы расчетного периода должны ложиться сравнительно равномерно и близко к теоретической кривой обеспеченности. Равномерность распределения эмпирических точек подтвердит также отсутствие резкого расхождения в величинах коэффициентов асимметрии за короткий и длинный периоды.

Если средний сток за принятый расчетный период несколько отличается от нормы, это расхождение должно быть устранено путем введения соответствующей поправки в гидрологические данные, например перемножением расходов расчетного периода на отношение нормы к среднему стоку последнего или путем введения коррективы в результаты водохозяйственных расчетов.

При наличии по рассматриваемому створу только короткого ряда репрезентативность этого ряда проверяется по разностной интегральной кривой ( $K - 1$ ) 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 связи с аналогом.

#### Л и т е р а т у р а

1. Потапов М. В. Регулирование стока. Сочинения, т. III, Сельхозгиз, М., 1951.
2. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1952.
3. Саваренский А. Д. Регулирование речного стока водохранилищами. АН СССР, 1951.
4. Ляпичев П. А. Методика регулирования речного стока. Госстройиздат, М., 1955.
5. Андреянов В. Г. Внутригодовое распределение речного стока. Гидрометеиздат, Л., 1960.
6. Андреянов В. Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Гидрометиздат, Л., 1957.



## ГЛАВА ШЕСТАЯ

### РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ПОТРЕБЛЕНИЯ

#### § 1. УСЛОВИЯ ПРИМЕНИМОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Применение статистических методов к расчетам регулирования основывается на том положении, что условия работы водохранилища определяются взаимодействием речного стока и потребления воды. При этом речной сток рассматривается как случайная величина, подчиняющаяся закону распределения вероятностей. Потребление же является продуктом деятельности человека и не обнаруживает случайных колебаний, если не считать колебаний, являющихся результатом изменчивости самого стока. Логически из этого вытекает система расчета, которая применяет математическую статистику непосредственно к явлениям речного стока и получает водохозяйственные характеристики как результат математического анализа исходя из распределения вероятностей стока.

Первоначально статистические методы расчета применялись лишь к годовым величинам стока, не учитывая внутригодовых периодических изменений его, поскольку случайные колебания в наиболее чистом виде проявляются именно в годовом стоке. Поэтому основанные на этом положении методы водохозяйственных расчетов, во-первых, решают только задачи многолетнего регулирования и, 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 неравномерностью стока, определяется независимо от первой и при помощи специальных методов.

Такое деление емкости водохранилища на составляющие части — многолетнюю и сезонную — является совершенно условным и возникло исторически в связи с первыми предложениями по методике статистических расчетов. (Указанные составляющие иногда просто называют многолетней емкостью и сезонной емкостью).

В последующем был сделан новый шаг в развитии теории регулирования стока, характеризовавшийся углублением и расширением области применения статистических методов. От годовых величин стока 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 был решен методический вопрос расчета регулирования стока на сложный график потребления — на отдачу, изменяющуюся в зависимости от водных ресурсов водохранилища.

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

Хазен исследовал связь интенсивности колебаний стока с величиной, потребной для поддержания заданной отдачи многолетней составляющей емкости водохранилища, и пришел к выводу, что между параметрами регулирования ( $A$ ,  $V_{\text{мн}}$ ,  $p$ ) и параметрами стока ( $\bar{W}$ ,  $C_v$ ) должна существовать функциональная зависимость

$$A = f(\bar{W}, C_v, V_{\text{мн}}, p).$$

Это явилось тем новым, что было внесено Хазеном в систему гидрологических и водохозяйственных расчетов и использовано советскими специалистами и учеными при разработке теории статистических методов расчета регулирования стока (о работе Хазена см. ниже, § 4).

Статистические методы расчета регулирования стока разрабатывались и развивались на базе гидрологических материалов хорошо изученных водотоков разных физико-географических зон, что позволяло проводить широкие обобщения. Некоторые из этих обобщений доводились до расчетных графиков, получивших всеобщее признание и распространение ввиду обоснованности, простоты расчета и сопоставимости результатов регулирования по ним.

В прошлом, когда по многим речным бассейнам гидрологические материалы полностью отсутствовали или имелись за не-

продолжительный период, такое развитие теории регулирования оказалось весьма плодотворным, так как стало возможным решать водохозяйственные задачи вне зависимости от наличия исходных гидрологических данных.

Основанные на использовании богатого опыта гидрологии по большому числу рек обобщенные методы расчета многолетнего регулирования исходят из 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 истекшем периоде. Таким образом, можно ожидать, что обобщенные методы расчета многолетнего регулирования дают более надежные результаты. В этом 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.

Приняты следующие обозначения:

а) годовой сток любого члена ряда — модульный коэффициент

$$K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}};$$

б) отдача — коэффициент регулирования

$$\alpha = \frac{Q}{\bar{Q}};$$

в) многолетняя емкость водохранилища — коэффициент емкости

$$\beta = \frac{V_{\text{мн}}}{\bar{W}};$$

г) обеспеченность бесперебойной отдачей, т. е. число лет, в которые будет гарантироваться отдача по отношению к общему числу лет ряда  $p$  в процентах и в долях от единицы.

Здесь  $Q_i$  — средний годовой расход любого года в  $\text{м}^3/\text{сек}$ ;  $\bar{Q}$  — средний многолетний расход в  $\text{м}^3/\text{сек}$ ;  $Q$  — зарегулированный (гарантированный) расход в  $\text{м}^3/\text{сек}$ ;  $V_{\text{мн}}$  — многолетняя емкость водохранилища в  $\text{м}^3$ ;  $\bar{W} = 31,5 \cdot 10^6$   $\bar{Q}$  — средний годовой объем стока в  $\text{м}^3$ .

## § 2. ПЕРВОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА

Метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1930 г.

Первое предложение по статистическим методам расчета регулирования стока в нашей стране сделали С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель в 1930 г. Этот метод был посвящен проблеме многолетнего регулирования. Заключается он в нахождении за маловодные  $n$ -летия «дефицитов стока», подлежащих покрытию из водохранилища, по разности между заданной отдачей и стоком принятой обеспеченности.

Сравнением дефицитов за ряд  $n$ -летий различной длительности устанавливается наибольшая величина дефицита, отождествляемого с потребной многолетней емкостью водохранилища и отвечающей ей длительности критического периода сработки водохранилища.

Практически решение задачи сводится к распространению формул, применяемых для определения статистических параметров годового стока отдельных членов ряда на последовательные суммы годовых величин стока за  $n$ -летия.

Пусть будет задан ряд в  $N$  лет с годовыми величинами стока  $K_1, K_2, K_3 \dots K_N$  и задана годовая отдача  $\alpha$ .

Если  $\alpha < K_i$ , то дефицита в этом году нет и отдача будет полностью обеспечена за счет притока в водохранилище. В годы, когда  $\alpha > K_i$ , дефицит имеется. Максимальная величина дефицита будет в наиболее маловодном году рассматриваемого ряда.

Так как в ходе стока наблюдаются группировки лет различной водности, дефицит, найденный анализом величин стока за отдельные годы при заданном  $\alpha$ , как правило, не даст максимальной величины его. Поэтому на следующем этапе расчетов нужно подвергнуть анализу дефициты за два смежных года, затем за три смежных года и т. д.

Средний сток за два смежных года равен

$$\frac{K_1 + K_2}{2}, \quad \frac{K_2 + K_3}{2} \dots \frac{K_{N-1} + K_N}{2};$$

за три смежных года

$$\frac{K_1 + K_2 + K_3}{3}, \quad \frac{K_2 + K_3 + K_4}{3} \dots \frac{K_{N-2} + K_{N-1} + K_N}{3} \quad \text{и т. д.}$$

Обозначая средние величины стока соответствующим индексом по числу лет взятой группировки через  $K_i^{(2)}, K_i^{(3)}, \dots, K_i^{(n)}$ , получим дефициты  $Z_i$ :

за два года

$$Z_i^{(2)} = (\alpha - K_i^{(2)}) 2,$$

за три года

$$Z_i^{(3)} = (\alpha - K_i^{(3)}) 3,$$

за  $n$  лет

$$Z_i^{(n)} = (\alpha - K_i^{(n)}) n.$$

Выборкой из каждой группировки наибольшего дефицита и построением соответствующей зависимости  $Z=f(n, \alpha)$  (рис. 1.6) определится максимальный дефицит при заданной отдаче  $\alpha$ . Величиной этого дефицита и определяется искомым размер потребной многолетней емкости водохранилища  $\beta$ .

При увеличении отдачи увеличивается дефицит и длительность критического периода сработки водохранилища, при уменьшении отдачи, наоборот, уменьшается дефицит и длительность критического периода сработки водохранилища (рис. 1.6). То, что с увеличением числа лет группировки дефицит вначале растет, а затем снижается, объясняется включением в нее многоводных лет, повышающих средний сток  $n$ -летия, вероятность появления которых увеличивается с расширением группировки.

Проведенный расчет многолетней емкости исходит из условий бесперебойной работы водохранилища при заданной отдаче, т. е. при 100%-ной обеспеченности, так как в каждой группировке выбирается наибольший дефицит. При ориентировке же на какую-то определенную обеспеченность  $p$  водность  $n$ -летий должна отвечать этой обеспеченности.

Тогда выражение для определения расчетного дефицита примет вид

$$Z_p^{(n)} = (\alpha - K_p^{(n)}) n. \quad (1.6)$$

Максимальный дефицит, определяющий требуемые размеры водохранилища, по-прежнему будет найден по зависимости, аналогичной показанной на рис. 1.6.

Таким образом, можно записать

$$\beta = \max Z_p^{(n)} = \max [(\alpha - K_p^{(n)}) n]. \quad (2.6)$$

Модульные коэффициенты годового стока за  $n$ -летия при заданной обеспеченности находятся по таблице С. И. Рыбкина, для чего нужно знать параметры кривых распределения за со-

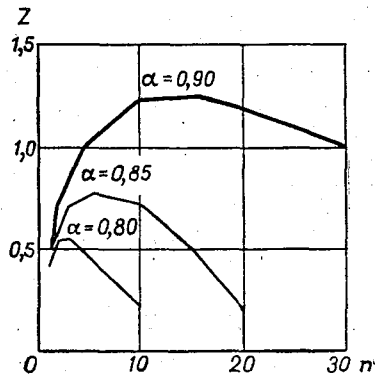


Рис. 1. 6. График зависимости  $Z=f(n, \alpha)$ .

ответствующие  $n$ -летия — коэффициенты изменчивости  $C_v^{(n)}$  и асимметрии  $C_s^{(n)}$ .

При наличии календарного ряда эти параметры можно определить обычным путем, последовательно рассматривая величины стока за два, три и т. д. рядом стоящих года. Однако, основываясь на известном из теории вероятности положении о том, что для ряда независимых случайных величин среднее квадратическое отклонение от нормы средних значений за группы из  $n$  членов  $\sigma^{(n)}$  в  $\sqrt{n}$  раз меньше среднее квадратическое отклонение от нормы отдельных членов ряда, указанные параметры с достаточной для практических целей точностью могут быть найдены приближенно, по соотношениям

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}, \quad C_s^{(n)} = \frac{C_s}{\sqrt{n}}. \quad (3.6)$$

Исходными, как легко видеть, являются параметры  $C_v$  и  $C_s$ , характеризующие кривую распределения вероятностей годовых величин стока (т. е. отдельных членов ряда).

Результаты расчета дефицитов записываются в следующей форме (табл. 1.6).

Таблица 1.6

$n$	$C_v^{(n)}$	$C_s^{(n)}$	$K_p^{(n)}$	$Z_p^{(n)} = (\alpha - K_p^{(n)})n$			
				$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
1	0,350	0,70	0,506	0,244	0,294	0,344	0,394
2	0,248	0,496	0,633	0,243	0,334	0,434	0,534
3	0,202	0,404	0,693	0,174	0,321	0,471	0,621
4	0,175	0,350	0,732		0,272	0,472	0,672
5	0,156	0,312	0,759			0,455	0,705
6	0,143	0,286	0,780			0,420	0,720
7	0,132	0,254	0,790				0,735
8	0,124	0,248	0,807				0,745
9	0,117	0,234	0,817				0,747
10	0,111	0,222	0,825				0,750
11	0,105	0,210	0,833				0,737

Абсолютные размеры многолетней емкости водохранилища по максимальному значению дефицита при заданной отдаче с принятой обеспеченностью  $p$  вычисляются по выражению

$$V_{\text{мн}} = \beta \overline{W}. \quad (4.6)$$

## Номограммы С. И. Рыбкина

Для облегчения расчетов по методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1930 г. Рыбкиным построены номограммы. По номограммам, составленным при значении  $C_s = 2C_0$ , по известному коэффициенту изменчивости годового стока и принятой обеспеченности  $p$  можно найти по заданной отдаче многолетнюю емкость водохранилища или, наоборот, по заданной емкости — отдачу. Непосредственно по номограммам получается и длительность критического периода сработки водохранилища.

Номограммы Рыбкина составлены для наиболее употребительных обеспеченностей 90, 95 и 97%.

### § 3. ПРИНЦИПЫ СТРОГОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

#### Метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1935 г.

Метод 1930 г. не вполне строг, на что обратили внимание сами авторы, так как не охватывает всех возможных комбина-

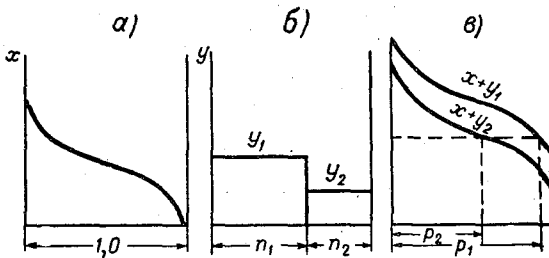


Рис. 2.6. Схема сложения кривых обеспеченности.

ций стока и не дает точного ответа на вопрос о том, насколько при заданных отдаче и емкости водохранилища вероятны случаи перебоев гарантированной отдачи за пределами расчетной обеспеченности. Вследствие этого ими же в 1935 г. был предложен второй метод расчета, исходящий непосредственно из анализа данного вопроса.

Метод 1935 г. основан на сложении кривых обеспеченности стока.

Пусть требуется получить кривую обеспеченности сумм  $z = x + y$ , причем  $x$  задана в виде непрерывной кривой обеспеченности  $a$ , а  $y$  — ступенчатой  $b$  (рис. 2.6.).

Суммы будут иметь величины или  $z = x + y_1$ , или  $z = x + y_2$ ; вероятность первых равна  $n_1$ , вероятность вторых —  $n_2$  (причем  $n_1 + n_2 = 1,0$ ). Кривые обеспеченности этих сумм, называемые

частными кривыми обеспеченности, получатся из непрерывной кривой  $x$  прибавлением ко всем ее ординатам в первом случае  $y_1$  и во втором  $y_2$  (рис. 2.6 в).

Обеспеченность  $p$  произвольно выбранной суммы  $z_i$  определится через обеспеченности частных сумм, которые обозначим  $p_1$  в ряду  $x+y_1$  и  $p_2$  в ряду  $x+y_2$ . Общая обеспеченность  $p$  суммы  $z_i$  в ряду тех и других сумм составит

$$p = p_1 n_1 + p_2 n_2. \quad (5.6)$$

Если кривая обеспеченности  $y$  задана в виде ряда ступенек  $\Delta n_1, \Delta n_2 \dots (\sum \Delta n_i = 1, 0)$ , то

$$p = \sum p_i \Delta n_i. \quad (6.6)$$

Если же кривая обеспеченности  $y$  задана равновеликими по основанию ступеньками, т. е. если  $\Delta n = \frac{1}{s}$ , где  $s$  число равных интервалов, то

$$p = \frac{1}{s} \sum p_i. \quad (7.6)$$

Если же кривая обеспеченности  $y$  также является непрерывной кривой, то

$$p = \int_{n=0}^{n=1} p_n dn. \quad (8.6)$$

Здесь  $p_n$  — функция от  $n$ .

Практические приемы решения задачи нахождения  $p$  при  $y$ , заданной в виде непрерывной кривой, сводятся к следующему.

Основание кривой  $y$  разбивается на  $s$  равных интервалов и для границ всех интервалов  $\Delta n_i$  определяются  $y_i$ , число которых  $s+1$ . Затем строятся частные кривые сумм  $x+y_i$  и по ним для любых значений сумм  $z_i$  во всем возможном их диапазоне находятся  $p_i$ . Так как число частных кривых на единицу больше, чем число интервалов, то  $p$  надо определять как средневзвешенное, пользуясь формулой трапеций

$$p = \frac{1}{s} \left( \frac{p_0}{2} + p_1 + p_2 + \dots + \frac{p_s}{2} \right). \quad (9.6)$$

Быстрее и точнее (так как исключаются погрешности при построении кривых сумм  $x+y$ ) эту же задачу можно решить, не строя частные кривые сумм. Для этого частные обеспеченности  $p_i$  нужно находить по основной кривой  $x$  по значениям  $x_i = z - y_i$ . Очевидно,  $p_i$  будет одинаковым, возьмем ли его по кривой сумм  $x+y_i$  при выбранном  $z$  или по основной кривой  $x$  при значении  $x_i = z - y_i$ .

Выяснив существо сложения кривых обеспеченности, можем теперь перейти к рассмотрению второго метода С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.



Пусть будут заданы: кривая обеспеченности годового стока, характеризуемая величинами  $C_v$  и  $C_s$ , многолетняя емкость водохранилища  $\beta$  и отдача  $\alpha$ . Требуется определить вероятность (относительное число) таких лет, в течение которых заданная отдача  $\alpha$  не будет полностью удовлетворяться, т. е. наступят перебои в подаче гарантированного количества воды  $\alpha$ . Какие именно годы следует отнести к перебойным?

Очевидно, те отдельные годы, в которые годово́й сток  $K < \alpha - \beta$ , т. е. дефицит стока  $\alpha - K$  не покрывается полными запасами воды в водохранилище  $\beta$ , являются безусловно перебойными. Чтобы получить число таких лет, надо взять на кривой обеспеченности (рис. 3.6, 1) ординату  $K = \alpha - \beta$ , обеспеченность которой  $p_{\alpha - \beta}$ . Тогда вероятность безусловно перебойных лет  $S_1$  будет  $S_1 = 1 - p_{\alpha - \beta}$ . При  $\alpha - \beta \leq K_{\text{мин}}$ , или  $\beta \geq \alpha - K_{\text{мин}}$ , безусловно перебойных лет не будет; также их не будет и при  $\beta \geq \alpha$ , так как даже если бы сток вообще отсутствовал ( $K = 0$ ), запасы водохранилища полностью смогут удовлетворить потребность в воде  $\alpha$  и вероятность перебойных лет становится равной нулю, т. е.  $S_1 = 0$ .

Вторую крайнюю группу лет в пределах обеспеченности от 0 до  $p_\alpha$  составляют годы, у которых  $K \geq \alpha$ . Отдача  $\alpha$  в такие годы полностью удовлетворяется стоком  $K$  и даже имеются избытки и, следовательно, они не будут перебойными.

Между этими двумя крайними группами лет с  $K \geq \alpha$  и  $K < \alpha - \beta$  имеются годы числом  $N_2 = p_{\alpha - \beta} - p_L$ , для которых  $\alpha > K > \alpha - \beta$ . Возможность полного удовлетворения отдачи  $\alpha$  в такие годы зависит от водности предшествующих лет. Если рассматриваемому году будет предшествовать маловодный год и водохранилище окажется сработанным настолько, что оставшимися запасами не покроеется дефицит  $\alpha - K$  данного года, такой год будет перебойным. Если же водохранилище в предшествующий год сработается незначительно или вовсе не сработается и запасы водохранилища окажутся достаточными для покрытия дефицита данного года, такой год перебойным не будет. Годы, входящие в группу  $N_2$ , ввиду неопределенности своего положения названы условно перебойными. Чтобы определить, какое число лет этой группы даст перебой совместно с одним предшествующим годом, необходимо построить кривую обеспеченности суммарных величин стока за двухлетия, состоящие из одного года группы  $N_2$  и одного предшествующего года.

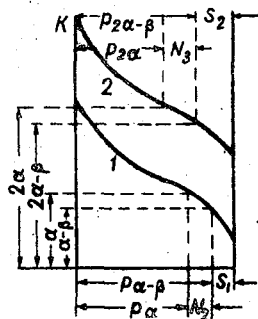


Рис. 3.6. Схема расчета по методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1935 г.

Задача, таким образом, сводится к построению кривой обеспеченности величин стока за двухлетия  $K_1 + K_2$ , из которых один ( $K_1$ ) является любым годом из группы  $N_2$  и второй ( $K_2$ ) — любым годом основного ряда. Иначе говоря, нужно сложить исходную кривую обеспеченности годовых величин стока (кривая  $I$  на рис. 3.6) с отрезком той же кривой в пределах ординат от  $K = \alpha$  до  $K = \alpha - \beta$ ; при этом абсциссы этой последней кривой должны быть приняты равными нулю при  $K = \alpha$  и единице при  $K = \alpha - \beta$ . Чтобы сложить указанные кривые, необходимо основание кривой  $N_2$  разбить на  $s$  равных интервалов и на границах интервалов определить соответствующие ординаты  $K_0, K_1 \dots K_s$ . Далее, задавшись несколькими значениями сумм  $K_1 + K_2$  и используя изложенный выше способ расчета, находят по исходной кривой (кривая  $I$ ) для каждой из этих сумм частные обеспеченности  $p_0, p_1, \dots, p_s$ , а по (9.6) средневзвешенные обеспеченности. В результате получим кривую 2 (рис. 3.6), которая и является искомой кривой обеспеченности двухлетних величин стока: один год из группы условно перебойных лет  $N_2$  и один из основного ряда.

Подвергнем анализу величины стока за двухлетия  $K_1 + K_2$ . Отдача за два года равна  $2\alpha$ . Двухлетия, в которые  $K_1 + K_2 < 2\alpha - \beta$ , будут безусловно перебойными. Число таких двухлетий  $S_2 = 1 - p_{2\alpha - \beta}$ . Двухлетия, в которые  $K_1 + K_2 \geq 2\alpha$ , благоприятны, так как отдача  $2\alpha$  полностью удовлетворяется стоком реки за два смежных года  $K_1 + K_2$ . Число таких двухлетий  $p_{2\alpha}$ . Двухлетия числом  $N_3 = p_{2\alpha - \beta} - p_{2\alpha}$ , для которых  $2\alpha > K_1 + K_2 > 2\alpha - \beta$  являются условно перебойными, так как если им будут предшествовать маловодные годы и водохранилище сработается настолько, что оставшиеся запасы его не покроют дефицита стока  $2\alpha - (K_1 + K_2)$ , они окажутся перебойными. В противоположном случае двухлетия перебойными не будут.

Найденное число безусловно перебойных двухлетий  $S_2$  присоединим к перебойному периоду  $S$ , а группу условно перебойных двухлетий  $N_3$  снова исследуем, рассматривая каждую из них совместно с одним предшествующим годом основного ряда. Для этого строится кривая обеспеченности трехлетних величин стока  $K_1 + K_2 + K_3$ , в состав которых входят двухлетия  $K_1 + K_2$  из группы  $N_3$  и один год основного ряда.

Аналогичный анализ кривой обеспеченности трехлетних величин стока позволит определить число безусловно перебойных трехлетий  $S_3 = 1 - p_{3\alpha - \beta}$ , число благоприятных трехлетий  $p_{3\alpha}$  и число условно перебойных трехлетий

$$N_4 = p_{3\alpha - \beta} - p_{3\alpha}$$

Найденное число безусловно перебойных трехлетий  $S_3$  также присоединим к перебойному периоду  $S$ , а группу условно пере-

бойных трехлетий  $N_4$  снова исследуем в сочетании с одним предшествующим годом. Затем найдем число безусловно перебойных четырехлетий  $S_4$ , число условно перебойных четырехлетий  $N_5$  и т. д. Каждое новое число безусловно перебойных  $n$ -летий присоединим к перебойному периоду  $S$  и в результате получим общее число перебойных лет, равное

$$S = S_1 + S_2 + \dots \quad (10.6)$$

Число перебойных лет  $S_i$  с увеличением числа лет  $n$  быстро убывает, поэтому расчет может быть ограничен небольшим числом слагаемых.

Так как при построении кривых обеспеченности величин стока двухлетий, трехлетий и т. д. только одна слагаемая, а именно исходная кривая обеспеченности однолетних величин стока, входит с весом единица (основание кривой равно единице), а остальные слагаемые с весом меньше единицы —  $N_2, N_3 \dots$ , то взятые с чертежа величины  $S_2, S_3 \dots$  и  $N_3, N_4 \dots$  отражают не абсолютные (безусловные вероятности), а относительные числа (условные вероятности) перебойных или условно перебойных двухлетий, трехлетий и т. д. Чтобы получить абсолютные значения этих величин, нужно учесть вес входящих слагаемых: для перебойных двухлетий  $S_2$  вес  $N_2$ , т. е.  $S_2 N_2$ , трехлетий  $S_3$  вес  $N_2$  и  $N_3$ , т. е.  $S_3 N_2 N_3$ , четырехлетий  $S_4$  вес  $N_2, N_3$  и  $N_4$ , т. е.  $S_4 N_2 N_3 N_4$  и т. д., а для условно перебойных двухлетий  $N_3$  вес  $N_2$ , т. е.  $N_3 N_2$ , трехлетий  $N_4$  вес  $N_2$  и  $N_3$ , т. е.  $N_4 N_2 N_3$ , и т. д.

Только после учета веса слагаемых величины  $S_i$  и  $N_{i+1}$  станут сопоставимыми с соответствующими величинами  $S_1$  и  $N_2$  и по выражению (10.6) можно будет определить суммарное число перебойных лет  $S$ .

Отсюда обеспеченность гарантированной отдачи из водохранилища  $\alpha$  по числу бесперебойных лет (в процентах) найдем как

$$p = 100(1 - S).$$

При практическом пользовании изложенным выше методом расчета многолетнего регулирования необходимо иметь в виду, что кривые обеспеченности суммарного стока  $z$  за двухлетия, трехлетия и т. д. строятся не во всем диапазоне его колебания, а лишь в той части, которая представляет практический интерес для расчета. А именно кривая  $K_1 + K_2$  строится в пределах от  $z_0 = 2\alpha$  до  $z_s = 2\alpha - \beta$ ; кривая  $K_1 + K_2 + K_3$  — в пределах от  $z_0 = 3\alpha$  до  $z_s = 3\alpha - \beta$  и т. д.

Для примера в табл. 2.6 приведены результаты расчета по методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1935 г. при следующих исходных данных:  $\alpha = 0,90$ ,  $\beta = 0,60$ ,  $C_v = 0,35$  и  $C_s = 2C_v = 0,70$ .

Таблица 2.6

$n$	$n\alpha - \beta$	$P_{n\alpha - \beta}$	$n\alpha$	$P_{n\alpha}$	Условные вероятности (%)		Безусловные вероятности (%)	
					$S_n$	$N_{n+1}$	$S_n$	$N_{n+1}$
1	0,30	99,7	0,90	57,4	0,3	42,3	0,3	42,3
2	1,20	91,7	1,80	35,2	8,3	56,5	3,5	23,9
3	2,10	87,2	2,70	30,2	12,8	57,0	3,1	13,6
4—7							4,2	
8	6,60	85,5	7,20	28,5	14,5	57,0	0,2	0,8
							$\Sigma 11,3$	

По приведенной таблице нетрудно составить суждение о последовательности и порядке расчета (вычисления для 4—7-летних не приводятся. Для них дано лишь общее число перебойных лет — 4,2%).

В этом примере расчет закончен при  $n=8$ , так как дальнейшее  $S_i$  будет, очевидно, пренебрежимо мало. Суммарное число перебойных лет, таким образом, получилось равным

$$S = 11,3\%$$

а обеспеченность гарантированной отдачи

$$p = 100 - 11,3 = 88,7\%$$

Ошибка в определении  $S$ , а следовательно, и  $p$  не может превышать числа условно перебойных  $n$ -леток, которыми заканчивается расчет, т. е. в данном случае не больше 0,8%, чем можно пренебречь.

Если полученная обеспеченность  $p$  не отвечает заданной, расчет необходимо продолжить при измененных  $\alpha$  или  $\beta$  до полного сближения  $p$ .

### Графики Я. Ф. Плешкова

Учитывая трудоемкость расчетов по методу 1935 г. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [3] высказали мнение о составлении номограмм, которые бы позволили легко и быстро решать задачи по многолетнему регулированию стока.

Труд по составлению таких номограмм взял на себя Я. Ф. Плешков [5]. Он построил расчетные графики (рис. 4.6), связывающие многолетнюю емкость водохранилища  $\beta$  с коэф-

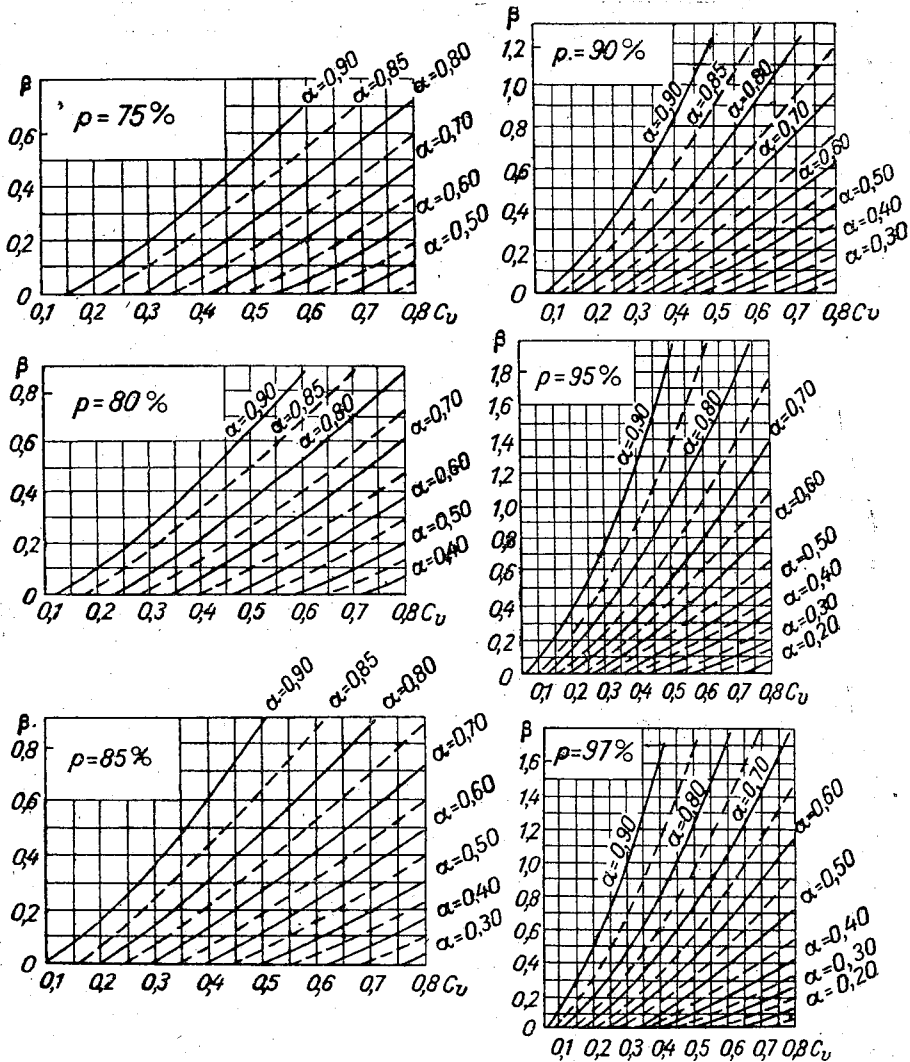


Рис. 4.6. Графики Я. Ф. Плешкова для расчета многолетнего регулирования стока.

коэффициентом регулирования  $\alpha$  и коэффициентом изменчивости годового стока  $C_v$  при определенных значениях обеспеченности: 75, 80, 85, 90, 95 и 97%. Указанные графики построены при наиболее распространенном соотношении между коэффициентами асимметрии и изменчивости стока  $C_s = 2C_v$  и для коэффициентов регулирования  $\alpha$  в диапазоне от минимального до максимального значения 0,90.

Пользование графиками никакой сложности не представляет. Если заданы, например, коэффициенты регулирования  $\alpha$  и обеспеченность  $p$ , совпадающая с обеспеченностью, при которой построен один из графиков, то по известному  $C_v$  непосредственно с графика снимается искомая емкость водохранилища  $\beta$ . Аналогичным образом по заданной емкости  $\beta$  может быть найден коэффициент регулирования  $\alpha$ .

В тех же случаях, если заданная обеспеченность отличается от обеспеченностей, при которых построены графики, или если заданы  $\alpha$  и  $\beta$  и искомой является обеспеченность  $p$ , то вначале искомую величину определяют по 2—3 смежным графикам и далее, связав ее с какой-либо из заданных величин ( $\beta$ ,  $\alpha$  или  $p$ ), по интерполяции находят требуемое.

### Метод А. Д. Саваренского

Значительным шагом в направлении совершенствования методики статистического расчета явилось опубликованное в 1940 г. предложение А. Д. Саваренского [8]. С его появлением стало возможным определять не только обеспеченность бесперебойной работы водохранилища на гарантированном режиме, но и находить другие очень важные элементы регулирования: распределение вероятностей наполнений водохранилища, вероятности и глубину перебоев, вероятности сбросов и др. На базе этого предложения разработана еще более совершенная методика расчета (см. гл. 8).

Исходя из известного положения, что наполнение водохранилища в конце какого-то интервала времени равно сумме наполнения в начале его и разности между притоком и стоком из водохранилища, Саваренский анализирует наполнения водохранилища, относящиеся к границам этих интервалов. При этом если приток задан в виде кривой обеспеченности, то и наполнения водохранилища получаются в виде соответствующей кривой обеспеченности. Может быть задана также и кривая обеспеченности наполнений водохранилища.

А. Д. Саваренский задает кривую обеспеченности начальных наполнений водохранилища и последовательными построениями приходит к расчетной (безусловной). Распределение вероятностей начальных наполнений задается произвольным, так как оно

сказывается на режиме водохранилища лишь в течение ближайших лет расчета и дальше быстро затухает. Критерием законченности расчета служит стабилизация формы кривых обеспеченности наполнений водохранилища.

Расчет выполняется способом сложения кривых обеспеченности сумм по заданным кривым обеспеченности слагаемых, использованным С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем в их методе 1935 г.

Решение задачи многолетнего регулирования на постоянную отдачу в отношении многолетней емкости водохранилища заключается в следующем.

Пусть будут заданы:

- а) кривая обеспеченности годового стока  $C_v$  и  $C_s$ ;
- б) величина отдачи за год  $\alpha$ ;
- в) многолетняя емкость  $\beta$ ;
- г) начальное наполнение водохранилища в виде определенного значения или в форме кривой обеспеченности. (В рассматриваемом ниже примере начальное наполнение водохранилища задано долей  $m$  от многолетней емкости  $\beta$ ).

Требуется найти обеспеченность бесперебойной работы водохранилища на гарантированной отдаче  $\alpha$ .

На кривой обеспеченности (рис. 5.6) отложим отдачу  $\alpha$ , вниз от нее начальное наполнение водохранилища  $m\beta$ , а вверх от отдачи свободную емкость  $(1-m)\beta$ .

В годы маловодные ( $K < \alpha$ ) с дефицитом, не превышающим имеющиеся запасы воды в водохранилище, т. е. при  $\alpha - K \leq m\beta$ , отдача будет обеспечиваться, и к концу таких лет водохранилище окажется сработанным по сравнению с начальным наполнением  $m\beta$  на величину дефицита. Годы с дефицитом  $\alpha - K > m\beta$  будут перебойными, несмотря на имеющиеся к началу их запасы воды. Число таких лет  $p_{\alpha - m\beta}$ . В годы многоводные ( $K > \alpha$ ) избыточный сток  $K - \alpha$  будет аккумулироваться в свободной емкости, и к концу года водохранилище окажется наполненным до пределов, превышающих начальное наполнение на величину избытков. В годы, у которых избытки больше свободной емкости  $(1-m)\beta$ , появятся сбросы. Число лет со сбросами составит  $p_{\alpha + (1-m)\beta}$ .

Таким образом, при заданном начальном наполнении  $m\beta$  к концу лет с обеспеченностью  $> p_{\alpha}$  водохранилище частично или полностью сработается, а к концу лет с обеспеченностью  $< p_{\alpha}$  — частично или полностью наполнится, поддерживая в течение каждого из них гарантированную отдачу  $\alpha$ . Следовательно, выполненным построением получена кривая распределения вероятностей наполнений водохранилища к концу первого года расчета, контуры которой в пределах обеспеченностей от  $p_{\alpha + (1-m)\beta}$  до  $p_{\alpha - m\beta}$  совпадают с очертаниями кривой обеспеченности стока (на рис. 5.6 см. заштрихованную фигуру).

Следующий этап расчетов сводится к построению кривой распределения вероятностей наполнений водохранилища к концу второго года при учете уже полученной кривой распределения вероятностей наполнений к концу первого года или, что то же, на начало второго года.

Этот расчет выполняется в той же последовательности, что и в первом году — нужно начальное наполнение водохранилища суммировать со стоком минус отдача. Так как начальное наполнение водохранилища задано в виде кривой распределения вероятностей, предварительно ее следует разбить на отдельные участки, т. е. от общей кривой распределения перейти к частным кривым, а затем уже по частям производить указанное суммирование наполнений с разностью стока и отдачи.

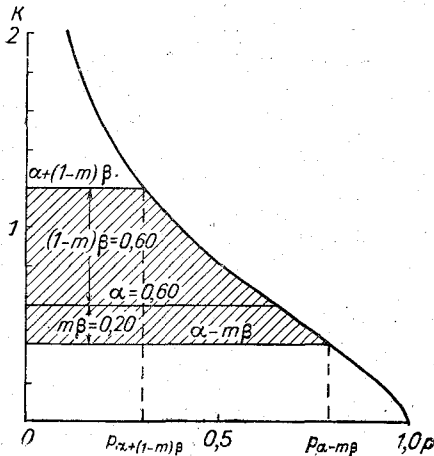


Рис. 5.6. Схема расчета по методу А. Д. Саваренского в первом году при  $c_v = 0,75$ ;  $C_S = 1,50$ ;  $\alpha = 0,60$ ;  $\beta = 0,80$ ;  $m = 0,25$ ;  $m\beta = 0,20$ .

Переход к частным кривым заключается в выделении участков 1, 2, 3... из общей кривой, в пределах которых ее кривизна незначительна. В рассматриваемом случае к первой частной кривой отнесен участок общей кривой с заполненной емкостью  $\beta_1 = \beta$ . На остальной части общей кривой, включая участок с нулевым наполнением, выделено еще четыре

частные кривые, представленные средними ординатами наполнений водохранилища  $\beta_2, \beta_3, \beta_4$  и  $\beta_5$  (рис. 6.6. а).

Далее в пределах частных кривых начальных наполнений необходимо построить кривые обеспеченности стока. Последние строятся путем приведения (умножением) абсцисс заданной кривой обеспеченности стока (рис. 5.6) к весу основания каждой кривой начальных наполнений  $n_1, n_2 \dots n_5$  (рис. 6.6 а), причем  $\sum n = 1$ . Затем на построенные таким образом частные кривые обеспеченности стока (рис. 6.6 б) наносится отдача, под ней начальное наполнение (например,  $\beta_3$ ), а над ней свободная емкость водохранилища (например,  $\alpha_3 = \beta - \beta_3$ ). Дефицит стока здесь также покрывается имеющимися к началу года запасами воды в водохранилище, а избытки аккумулируются в свободной емкости  $a_1, a_2 \dots$ . В результате получаем частные кривые распределения вероятностей наполнений водохранилища к концу



Помимо упомянутых выше задач, решаемых с помощью методов Саваренского, этот метод позволяет также выявить условия работы водохранилища в годы его первоначального наполнения. Особенно это важно при очень больших мертвых объемах и полезных емкостях по отношению к среднему годовому стоку, как

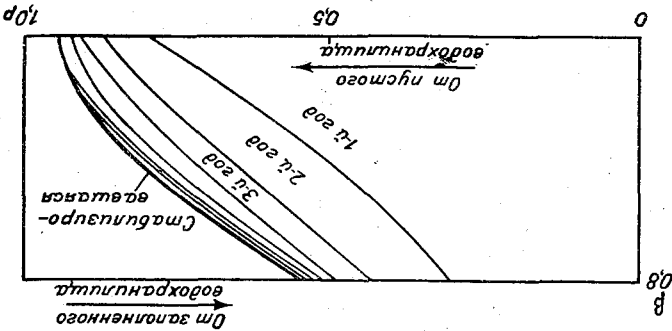
емкости) — влево. (б) при большом наполнении (например при заполненной емкости) — вправо (рис. 7.6);

а) при малом начальном наполнении — вправо (как в рас-смотре нам примере — рис. 7.6);

ростности наполнения к форме стабилизации происходит. ния водохранилища трансформация кривой распределения ве- В зависимости от величины заданного начального наполне- дохранилища по заданному режиму.

наполнений водохранилища) при очень длительной работе во- лоний многолетней емкости (иначе говоря, предположитель- вавшаяся кривая дает среднее распределение вероятностей на- ростиности наполнений водохранилища. Сама же стабилизиро- вой ординате стабилизировавшаяся кривой распределения ве-

Рис. 7.6. Кривые обеспеченности наполнения водохранилища в конце различных лет расчета.



водохранилища. Эта обеспеченность равна абсциссе при нуле- данной отдачи при известных характеристиках стока и емкости об обеспеченности бесперебойной работы водохранилища с за- В результате проведенного расчета получен ответ на вопрос (рис. 7.6). На этом расчет заканчивается.

тех пор, пока последующая кривая не совпадает с предыдущей лучения общей кривой на конец третьего года. Расчет продол- проводим расчет тем же порядком, что и во втором году, до по- начальных наполнений в третьем году и заменяя ее частями. Принимаем эту кривую за кривую распределения вероятностей нец второго года.

распределения вероятностей наполнений водохранилища на ко-

второго года, очертия которых совпадают с границами за-  
 штрихованных участков чертежа. Верхними ординатами этих  
 кривых, как видно из проведенного построения, является полная  
 полезная емкость водохранилища  $\beta$ , а нижними ординатами —

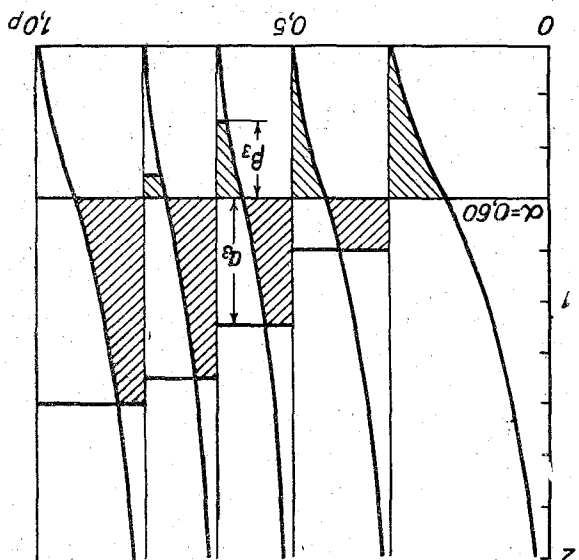
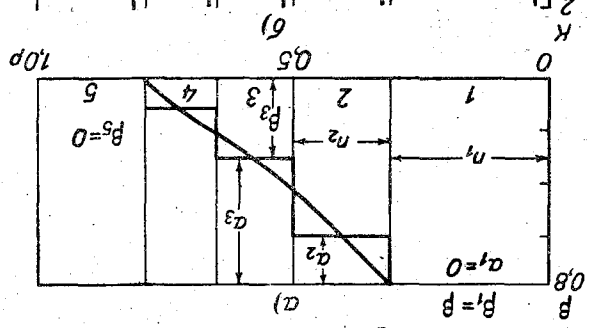


Рис. 6.6. Схема расчета по методу  
 А. Д. Саваренского во втором году.

$a$  — разбивка общей емкости водохранилища на частные,  $b$  — расчет частных  
 кривых обеспеченности конечных наполнений водохранилища.

пустая емкость ( $\beta=0$ ). В координатах кривых обеспеченности  
 стока первая из указанных ординат равна  $\alpha+a$ , а вторая  
 $\alpha+a-\beta$ .

Суммированием абсцисс частных кривых для нескольких  
 значений ординат наполнений водохранилища в диапазоне от  
 полной емкости  $\beta$  до  $\beta=0$  определяются абсциссы общей кривой

это имеет место, например, на Бухтарминском (р. Иртыш), Братском (р. Ангара) и ряде других водохранилищ. Тогда, начиная расчет с пустого водохранилища, получают распределение вероятностей наполнений водохранилища к концу первого, второго и т. д. лет наполнения, что весьма существенно для правильного назначения темпов ведения строительных работ, планирования ввода в эксплуатацию отдельных агрегатов и сооружений и т. п.

В заключение отметим, что изложенная выше схема расчета регулирования одними авторами называется методом кривых обеспеченности наполнений водохранилища, другими — композиционным методом.

#### § 4. МЕТОД РАСЧЕТА И ГРАФИКИ Г. П. ИВАНОВА

По мнению Г. П. Иванова, высказанному им в 1939 г., методы расчета многолетнего регулирования стока, основанные на теоретических предположениях, представляют сложный вопрос об изменении стока во времени схематизированно. Кроме того, эти методы громоздки, так как обычно задаваемая условиями водохозяйственной задачи обеспеченность не может быть подтверждена в результате одного расчета, и этот расчет приходится повторять (см. выше).

С другой стороны, как на это уже обращалось внимание, расчеты многолетнего регулирования, основанные на непосредственном использовании гидрологических наблюдений, могут привести к более или менее случайным результатам даже при значительной длительности ряда (порядка 40—50 лет). В этом можно легко убедиться, сопоставляя величины потребной емкости водохранилища, определенные по интегральной кривой стока для различных частей периода наблюдений (см. выше, гл. 3). При этом возможно как преувеличение, так и преуменьшение необходимой емкости для заданной обеспеченности регулируемой отдачи.

Стремясь устранить недостатки, свойственные расчетам как по теоретическим схемам, так и по календарным гидрологическим рядам, Иванов предложил (1939 г.) следующий метод.

Метод Г. П. Иванова преемственно связан с известным методом Хазена [6], заключающимся в пользовании специальным графиком, связывающим многолетнюю емкость водохранилища с величиной регулируемой отдачи при различной обеспеченности. Этот график Хазен (1914 г.) построил на основе данных расчетов многолетнего регулирования по 300-летнему гидрологическому ряду, искусственно составленному из наблюдений по 14 рекам США. Длительность наблюдений по отдельным рекам колебалась в пределах от 9 до 44 лет, а в среднем равна 21 году. При составлении общего 300-летнего непрерывного ряда Хазен

расположил отдельные гидрологические ряды в порядке возрастания коэффициента изменчивости годового стока. Естественно, что если наблюдения по отдельным рекам расположить в другой последовательности, получится и другой результат, так как изменится чередование многоводных и маловодных группировок лет. Расчетный график Хазен построил по кривым продолжительности сработок водохранилища неограниченной емкости, что совершенно неправильно, так как в число лет с необеспеченной отдачей оказались включенными также вполне обеспеченные годы, в которые водохранилище наполняется после расчетной сработки.

Указанные условности (составление непрерывного ряда из данных по разным рекам и др.), малая длительность наблюдений по отдельным рекам и допущенные принципиальные ошибки в построении самого графика (принятие кривой продолжительности сработок водохранилища за зависимость, выражающую связь между емкостью водохранилища и обеспеченностью его бесперебойной работы) обесценили предложенный Хазеном график.

Несмотря на погрешности в расчетах и ошибочность результирующего графика, примененная Хазеном схема в целом весьма интересна и заслуживает внимания.

Воспользовавшись схемой Хазена и исключив допущенные им ошибки, Г. П. Иванов на основе значительно более обширного гидрологического материала разработал графики для расчета многолетнего регулирования. Им дано также решение задачи с учетом несимметричности распределения годового стока, в значительной мере влияющей на потребную емкость водохранилища, в особенности при низких коэффициентах регулирования и высоких значениях обеспеченности.

Расчетные зависимости Ивановым получены путем обобщения результатов многолетнего регулирования по конкретным гидрологическим рядам 18 рек, протекающих в различных физико-географических зонах СССР и зарубежных стран. Длительность наблюдений по отдельным рекам составляет от 29 лет (Кура, Енисей) до 118—121 года (Рейн, Неман). Общая длительность наблюдений по всем 18 рекам составляет 1000 лет, что в среднем дает 55 лет.

Краткие сведения о реках и параметрах их годового стока, данные по которым использованы при построении расчетных графиков, приведены в табл. 3.6.

Метод Г. П. Иванова, так же как и остальные излагаемые в настоящей главе методы, посвящен установлению многолетней составляющей емкости водохранилища. Поэтому расчеты регулирования для построения графиков выполнялись по годовым величинам стока.

Таблица 3.6

Река	Пункт	Площадь бассейна, км <sup>2</sup>	Число лет наблю- дений	Норма стока		Коэффициент изменчивости $C_v$	Коэффициент асимметрии $C_s$	Коэффициент корреляции $r$
				расход, м <sup>3</sup> /сек	модуль стока, л/сек с 1 км <sup>2</sup>			
Свирь	Мягусово	63 765	58	620	9,72	0,253	0,52	0,24
Волхов	Гостинополье	75 665	57	581	7,68	0,244	0,32	0,26
Сев. Двина	Усть-Пинега	358 822	51	3 482	9,75	0,235	0,46	0,23
Волга	Ярославль	154 000	51	1 143	7,43	0,236	-0,05	0,28
Ока	Калуга	54 000	51	322	5,96	0,255	0,17	0,21
Кама	Пермь	167 521	56	1 660	9,94	0,201	0,23	0,13
Чусовая	Копчик	11 164	53	79,5	6,87	0,302	0,28	0,28
Белая	Бирск	119 500	50	916	7,66	0,276	0,52	0,29
Сакмара	Сакмарская	27 690	44	131	4,73	0,531	0,50	0,08
Дон	Калач	224 000	51	692	3,09	0,308	0,67	0,14
Днепр	Киев	326 500	59	1 399	4,28	0,238	0	0,14
Кура	Тбилиси	21 403	29	202	9,44	0,160	-0,29	0,22
Чирчик	Чимбайлык	11 156	33	242	21,7	0,242	0,68	0,19
Иртыш	Семипалатинск	190 553	45	860	4,51	0,291	0,36	0,09
Енисей	Красноярск	300 715	29	2 815	9,36	0,125	-0,54	0,10
Неман	Смалинки	81 231	121	546	6,72	0,178	0,48	0,17
Рейн (Швейцария)	Базель	35 929	118	1 021	28,4	0,157	0,23	0,08
Крогон (США)	—	875	44	16,7	19,1	0,236	0,64	0,41
	Сумма		1000		Среднее	0,248	0,29	0,19

Выражения отдачи и емкости водохранилища, заимствованные у Хазена, приняты в виде функций от коэффициента изменчивости годового стока  $C_v$  и объема среднего годового стока  $\bar{W}$ :

а) коэффициент регулирования

$$\alpha = 1 + \Phi C_v, \quad (11.6)$$

б) емкость водохранилища

$$V = \xi C_v \bar{W}, \quad (12.6)$$

где  $\Phi$  — параметр,  $\xi$  — коэффициент емкости.

По данным о годовом стоке (для озерных рек — притоке) были построены в косоугольных координатах и в долях от нормы (модульных коэффициентах) интегральные кривые для указанных 18 рек. Задавая величину коэффициента регулирования в форме (11.6), при значениях  $\Phi$ , последовательно равных 0; -0,2; -0,5; -1,0 и -1,5, на интегральных кривых проведены расчеты регулирования в пределах маловодных периодов и получены величины требуемых сбросов водохранилища (рис. 8.6 а). Эти сбросы отвечают дефицитам стока по отношению к заданной отдаче и, следовательно, выражают размеры потребной емкости водохранилища в долях от нормы годового стока  $\beta = \frac{V}{\bar{W}}$ .

Представляя эту же емкость в долях среднеквадратического отклонения  $\sigma_w = C_v \bar{W}$ , будем иметь

$$\xi = \frac{V}{\sigma_w} = \frac{\beta}{C_v}. \quad (13.6)$$

При таком выражении емкости путем приведения ее к  $\bar{W} = 1$  и  $C_v = 1$  она получается независимой от нормы годового стока и коэффициента его изменчивости, благодаря чему в отношении потребной емкости водохранилища все реки приводятся к общему виду.

Величина  $\xi$  названа поэтому «приведенным коэффициентом многолетней емкости водохранилища».

По вычисленным для каждого года величинам  $\xi$  были построены хронологические графики (рис. 8.6 б)  $\xi = f(T, \alpha)$ . По этим графикам произведен подсчет лет, в течение которых при заданной величине  $\xi$  не обеспечивается регулируемая отдача  $\alpha$ .

Подсчет обеспеченности  $p$  регулируемой отдачи при различных значениях  $\xi$  (задавался через 0,2) производился по формуле (в процентах)

$$p = \frac{m}{n} 100\%, \quad (14.6)$$

где  $m$  — число лет, в которые обеспечивается регулируемая отдача;  $n$  — общее число лет наблюдений по данной реке.

По полученным таким образом данным для 18 рек построены графики вида, показанного на рис. 9.6, для значения  $\Phi=0$ , выражающие зависимости  $\xi=f(p, \alpha)$ .

Рассмотрение указанных графиков показало, что для одного и того же значения  $\xi$  величина обеспеченности  $p$  для различных рек имеет довольно значительную амплитуду изменения (при-

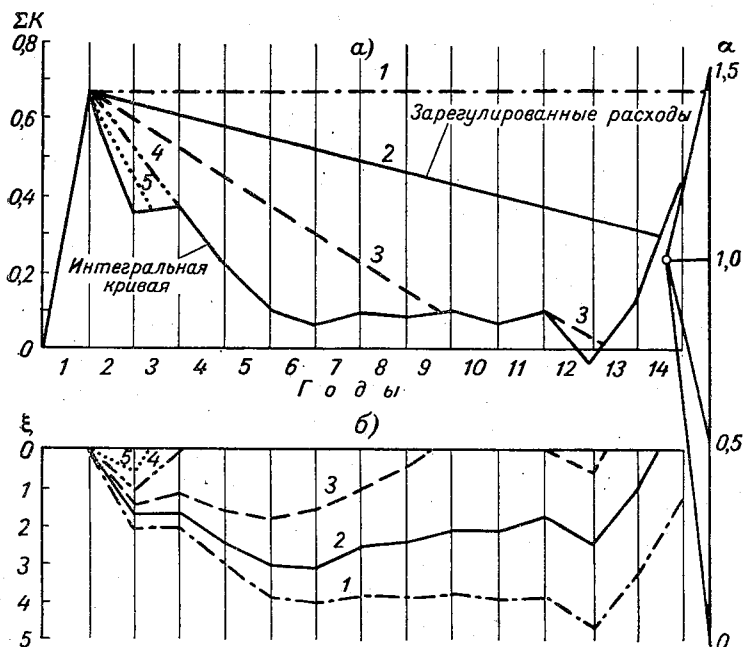


Рис. 8.6. Схема расчета по методу Г. П. Иванова.

а — интегральные кривые стока и зарегулированных расходов, б — графики теоретического срабатывания водохранилища,  $1-\alpha_1=1$ ,  $2-\alpha_2=1-0,2C_v=0,97$ ,  $3-\alpha_3=1-0,5C_v=0,92$ ,  $4-\alpha_4=1-C_v=0,84$ ,  $5-\alpha_5=1-1,5C_v=0,76$ .

мерно 20%). Такое положение вполне закономерно и является следствием:

а) различной гидрометеорологической обстановки в бассейнах отдельных рек, обусловившей и различное чередование водности лет на них, что подтверждается низкими коэффициентами корреляции между величинами годового стока смежных и в особенности удаленных друг от друга рек, колеблющимися от 0,23 (Дон—Чирчик) до 0,75 (Ока—Днепр);

б) неодинаковой длительности периода наблюдений;

в) неодинаковой асимметричности распределения годового стока;

г) неодинаковой тесноты связи между стоком за смежные годы (см. табл. 3.6).

Эти графики могут служить иллюстрацией случайных решений, к которым можно прийти при определении емкости водохранилища путем непосредственного расчета по конкретному гидрологическому ряду.

Чтобы исключить случайные отклонения в обеспеченности регулируемой отдачи при заданном значении  $\xi$ , составлены

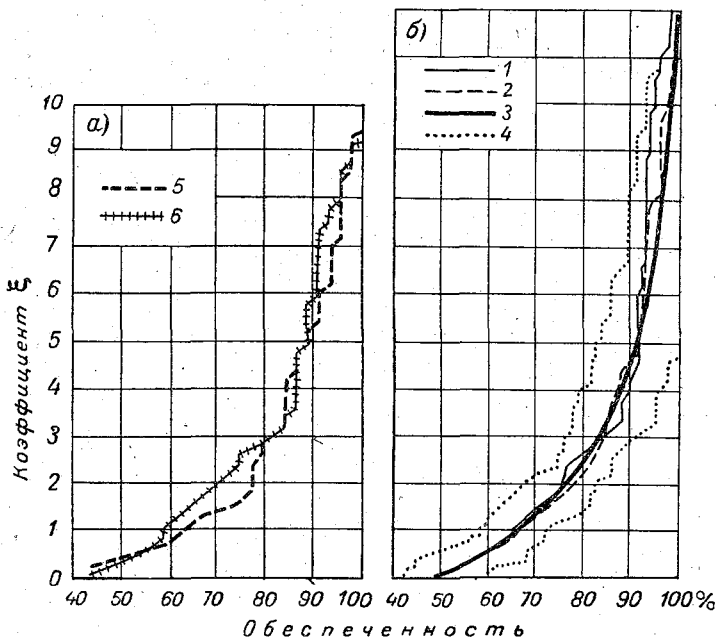


Рис. 9.6. Частные (а) и средние (б) кривые зависимости  $\xi=f(p)$  при  $\Phi=0$ .

1 — Неман, 2 — Рейн, 3 — средняя для 18 рек, 4 — огибающие для 18 рек, 5 — Сакмари (СССР), 6 — Кротон (США).

средние графики  $\xi=f(p, \alpha)$  как средневзвешенные по обеспеченности частных кривых, вычисленной по выражению

$$p = \frac{\sum m}{\sum n} \cdot 100, \quad (15.6)$$

где  $\sum m$  — суммарное число лет по всем рекам, в которые обеспечивается регулируемая отдача;  $\sum n$  — суммарное число лет наблюдений по всем 18 рекам, равное 1000.

Сопоставление построенных графиков показывает, что со средними, дающими среднее (нормальное) соотношение между



расчетными величинами, в основном совпадают частные графики при очень длинных рядах, какие имеются по Рейну (118 лет) и Неману (121 год). Для периодов относительно небольшой длительности могут иметь место значительные отклонения частных графиков от средних. Это позволило считать, что при длинных рядах графики  $\xi = f(p, \alpha)$  при  $\Phi = \text{const}$  во всех случаях должны приближаться к определенным устойчивым зависимостям.

Так как при разработке графиков использовались гидрологические данные по рекам, протекающим в существенно различных физико-географических условиях, то это позволило Г. П. Иванову заключить, что полученные на основании частных графиков по 18 рекам средние графики  $\xi = f(p, \alpha)$  могут приниматься в качестве расчетных для всех рек независимо от их географического положения. Общее значение этих графиков подтверждается также высказанными выше соображениями относительно совпадения со средними частных графиков по Рейну и Неману, находящихся в различных физико-географических условиях (для Рейна  $\mu = 28,4$  л/сек с 1 км<sup>2</sup>, Немана — 6,7 л/сек с 1 км<sup>2</sup>). То же подтверждается значительным совпадением со средним частных графиков при  $\Phi = 0$  (рис. 9.6) для Сакмары (СССР) и Кротона (США), несмотря на то, что эти реки находятся на разных континентах и имеют различные гидрологические характеристики (для Сакмары  $\mu = 4,7$  л/сек с 1 км<sup>2</sup>, Кротона — 19,1 л/сек с 1 км<sup>2</sup>).

С целью приведения расчетных графиков к форме, удобной для практического использования, составлен обобщенный график (рис. 10.6).

Обобщенным графиком следует пользоваться в том случае, если коэффициент асимметрии годового стока близок к среднему значению для рассмотренных 18 рек —  $C_s \cong 0,30$  (см. табл. 3.6), а также при обеспеченности регулируемой отдачи менее 95%, когда степень несимметричности распределения годового стока не влияет на величину многолетней емкости водохранилища.

Влияние несимметричности распределения годового стока, установленное методом корреляции между величинами  $C_s$  и  $\xi$ , существенно сказывается при низких значениях  $\alpha$  (при  $\Phi = -0,5$  и более) и в пределах обеспеченностей 95—100%. Что же касается высоких значений  $\alpha$  (при  $\Phi = < -0,5$ ), то для них на величину  $\xi$  асимметричность влияния не оказывает.

Расчетные графики вида  $\xi = f(\Phi, C_s)$  для обеспеченностей 95, 97 и 100% представлены на рис. 11.6.

Надо иметь в виду, что графики Иванова, отвечающие 100%-ной обеспеченности, получены на основе рассмотрения реально наблюдавшегося хода стока и не отражают наиболее неблагоприятных сочетаний стока маловодных лет. Поэтому

правильнее использовать их как отвечающие обеспеченности примерно 99%. Графики же для обеспеченностей 97% и ниже можно использовать без внесения коррективов.

Чтобы по заданному  $\alpha$  и известному  $C_s$  по графикам найти величину  $\xi$ , необходимо, используя (11.6), предварительно вычислить  $\Phi = \frac{\alpha - 1}{C_s}$ .

Графики Иванова дают ответы на вопросы о величине мно-

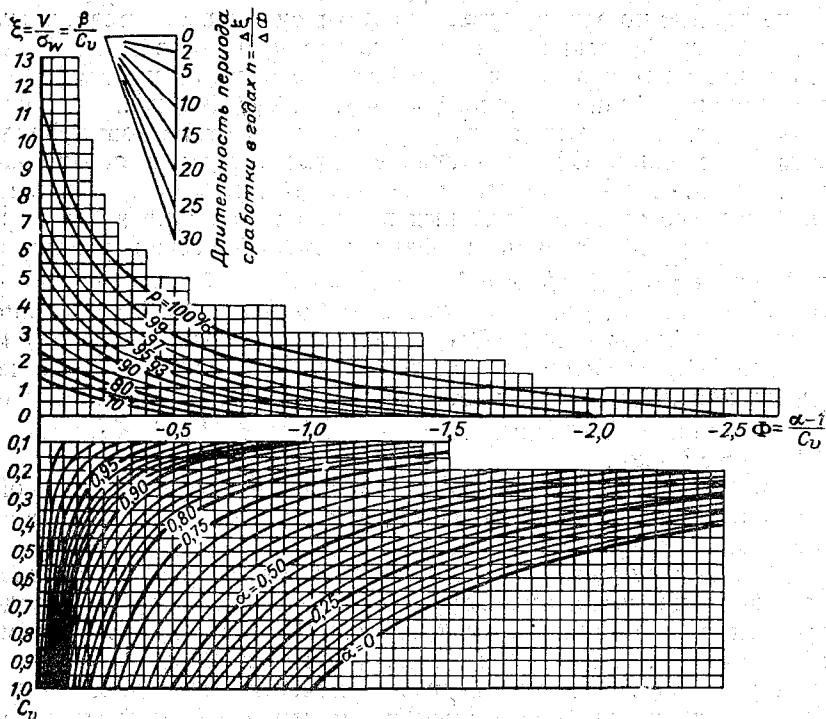


Рис. 10.6. Обобщенный график Г. П. Иванова для расчета многолетнего регулирования стока.

голетней емкости водохранилища или коэффициента регулирования с большой простотой и минимумом затраты труда.

Следует отметить, что результаты расчетов многолетнего регулирования по графикам Иванова очень близки к результатам расчетов по методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1935 г. (и по графикам Я. Ф. Плешкова), что подтверждает их правильность [4], [7]. Вместе с тем они обладают существенными преимуществами перед графиками Плешкова, давая решение задачи в зависимости от коэффициента  $C_s$  (т. е. не связывая вопрос

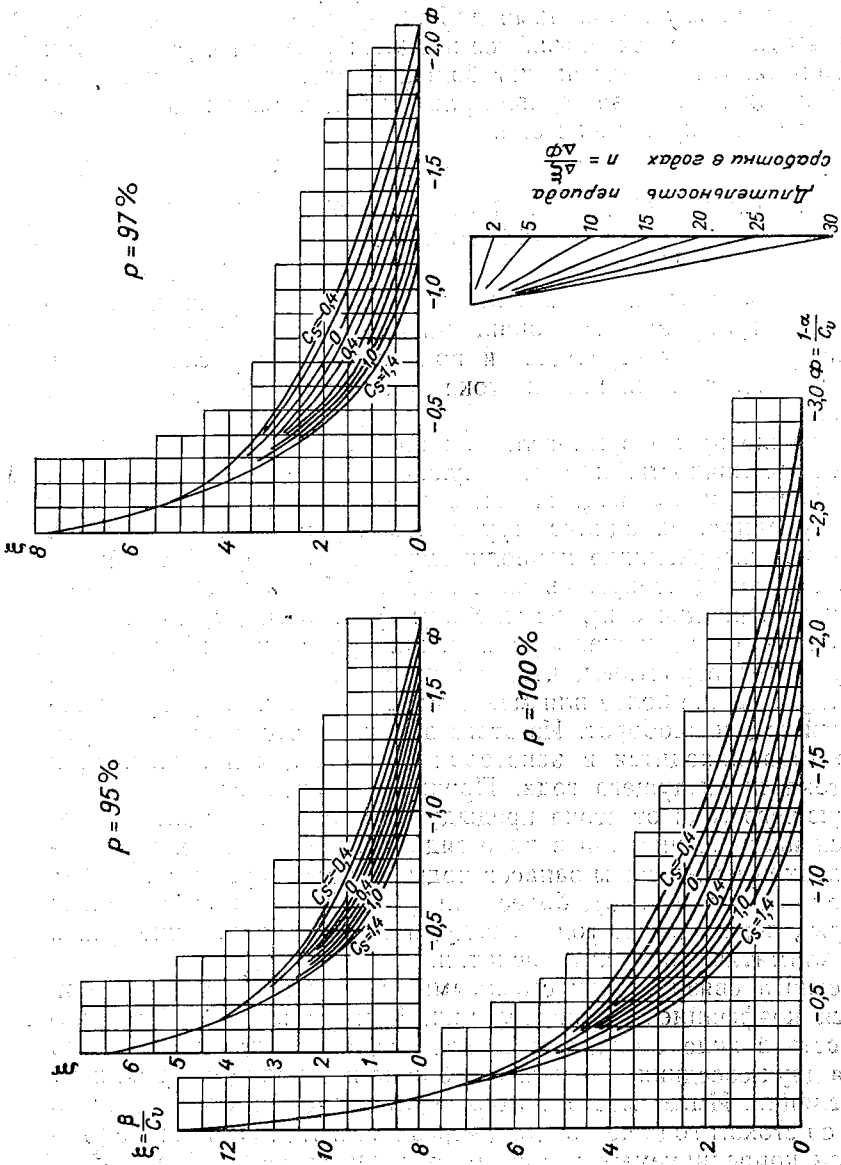


Рис. 1.6. Графики Г. П. Иванова для расчета многолетнего регулирования стока  $\xi = f(\Phi, C_s)$ .

с соблюдением соотношения  $C_s=2C_v$ ) и для коэффициентов регулирования во всем возможном диапазоне — практически до  $\alpha=1$ , вместо максимального  $\alpha=0,90$  в графиках Плешкова.

К указанному необходимо добавить, что ценность работы Г. П. Иванова не исчерпывается предложенными им расчетными графиками. Она представляет большой методологический интерес как прием анализа условий работы водохранилища при многолетнем регулировании стока.

## § 5. УЧЕТ КОРРЕЛЯТИВНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ВЕЛИЧИНАМИ ГОДОВОГО СТОКА

Рассмотренные выше статистические методы расчета многолетнего регулирования основаны на том положении, что чередование лет различной водности подчинено закону случайности, т. е. что между величинами стока за смежные годы отсутствует связь.

В то же время в многолетних колебаниях стока прослеживается цикличность, характеризующаяся чередованием групп многоводных и маловодных лет. В длительностях и чередовании этих группировок, однако, трудно обнаружить сколько-нибудь отчетливо выраженную периодическую закономерность или достаточно определенную связь с каким-либо заведомо подверженным периодическим изменениям фактором, определяющим многолетний ход стока. При наличии указанной цикличности будет более вероятным, что, например, за маловодным годом последует также более или менее маловодный, чем сразу многоводный год, и наоборот. Из этого вытекает, что сток последующего года находится в некоторой коррелятивной зависимости от стока предыдущего года. Причиной зависимости стока последующего года от стока предыдущего года, по-видимому, является наличие инерции в ходе гидрологических явлений, обусловленной изменением запасов воды на водосборе (в водоемах, подземных вод и т. д.), более или менее значительные остатки которых переходят от года к году, а также наличие инерции в ходе климатических факторов и т. п.

Теснота связи между смежными величинами стока оценивается коэффициентом корреляции. Чем резче выражена цикличность в ходе стока, тем теснее связь между величинами стока двух соседних лет, т. е. тем ближе к единице коэффициент корреляции. Имеет место, но более слабая, связь стока данного года со стоком года через один, через два и т. д. При этом с удалением коррелируемых лет связь становится все слабее.

П. А. Ефимович [10] показал, что при наличии цикличности в колебаниях стока и сопутствующей ей коррелятивной связи между величинами годового стока коэффициент изменчивости

для ряда, составленного из средних модульных коэффициентов стока за  $n$ -летия должен быть выражен не в форме (3.6), а более сложной зависимостью

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} [r_1(n-1) + r_2(n-2) + r_3(n-3) \dots]}, \quad (16.6)$$

где  $r_1$  — коэффициент корреляции между величинами стока за смежные годы;  $r_2$  — то же для лет через один;  $r_3$  — то же для лет через два и т. п.

Ввиду относительной малости коэффициентов  $r_2, r_3$  и т. д. обычно их можно исключить. Тогда выражение (16.6) упрощается следующим образом:

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} r_1(n-1)}. \quad (16'.6)$$

Выражение (16'.6) свидетельствует о том, что величина  $C_v^n$  при учете коррелятивной связи оказывается больше, чем без учета этой связи; поэтому и потребный объем водохранилища должен получиться больше, чем при принятии коэффициента изменчивости по формуле (3.6). Разница в объеме водохранилища при высоких значениях  $\alpha$  и сравнительно больших коэффициентах корреляции может достигнуть 50—70% и даже больше.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [11], исследовавшие рассматриваемый вопрос, также пришли к выводу, что наличие связи между величинами стока за смежные годы вносит известное изменение в статистические характеристики гидрологических рядов, что оказывает непосредственное влияние на результаты водохозяйственных расчетов.

К анализу многолетних колебаний гидрологических величин, между смежными значениями которых существует коррелятивная связь, Крицкий и Менкель привлекли закономерности так называемых цепей Маркова, т. е. рядов случайных величин, коррелятивно связанных между собой. Это позволило им вывести некоторые математические зависимости, характеризующие отмеченные выше изменения параметров стока, в частности зависимости для определения среднеквадратического отклонения ряда, составленного из стока за  $n$ -летия, несколько уточняющие формулу (16.6).

На основании имевшихся у Ефимовича данных по 25 рекам Европейской территории СССР (1934 г.) средние коэффициенты корреляции оказались равными:  $r_1 = 0,33 \pm 0,04$ ;  $r_2 = 0,15$ ;  $r_3 = 0,07$  и далее  $r = 0$ .

Д. Л. Соколовский [12] установил, что, если исключить семь озерных и зарегулированных рек, принятых Ефимовичем, по-

лучится  $r_1 = 0,22 \pm 0,19$ , т. е. величина коэффициента корреляции лишь незначительно превышает величину средней ошибки. Это дает основание считать этот коэффициент корреляции случайным (для уверенного суждения о величине коэффициента корреляции необходимо, чтобы она превышала среднюю ошибку в 3 раза).

Более поздние исследования, проведенные рядом авторов на обширном гидрологическом материале, показали, что для небольших и средних водотоков, с площадями водосборов до 50 тыс. км<sup>2</sup>, годовые объемы стока могут рассматриваться как совершенно независимые. Для крупных же водотоков, с водосборными площадями порядка нескольких сот тысяч квадратных километров, коэффициенты корреляции между величинами стока за смежные годы в среднем по большому числу рек имеют меньшие значения, чем те, которые определил Ефимович, и ближе к уточненному Соколовским. По отдельным крупным водотокам они колеблются в больших пределах.

Так, для 18 рек, использованных Ивановым при разработке им метода многолетнего регулирования стока, коэффициент корреляции в среднем оказался равным  $r_1 = 0,19$ , изменяясь по отдельным рекам от 0,08 до 0,41 (см. табл. 3.6).

Исследования С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [4] по 37 рекам с общим числом лет наблюдений 2141 показали, что коэффициент корреляции между стоком смежных лет в среднем составляет 0,24, а по отдельным рекам колеблется от 0 до 0,45.

Судя по тому, что расчетные графики Иванова, в которых учтено влияние связи между стоком смежных лет со средней величиной коэффициента корреляции  $r_1 = 0,19$ , совпадают с графиками Плещкова, построенными без ее учета, наличие связи, характеризующейся коэффициентом корреляции до 0,2, практически не влияет на величину потребной многолетней составляющей емкости водохранилища и ее можно не учитывать в расчетах регулирования. При наличии же более тесной связи, как на это впервые обратил внимание П. А. Ефимович, неучет коррелятивной связи между годовыми величинами стока может привести к заметным погрешностям, с чем нельзя не считаться. Эта погрешность возрастает с повышением изменчивости стока, степени многолетнего регулирования и расчетной обеспеченности.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [13] разработали метод учета коррелятивной связи между величинами годового стока при расчете многолетнего регулирования стока.

Из сопоставления графиков, построенных И. В. Гуглием по указанному методу при  $r = 0,30$  (рис. 12.6), с графиками Я. Ф. Плещкова (см. рис. 4.6) видно, что, например, при изменчивости годового стока 0,40, обеспеченности 97% и многолетней

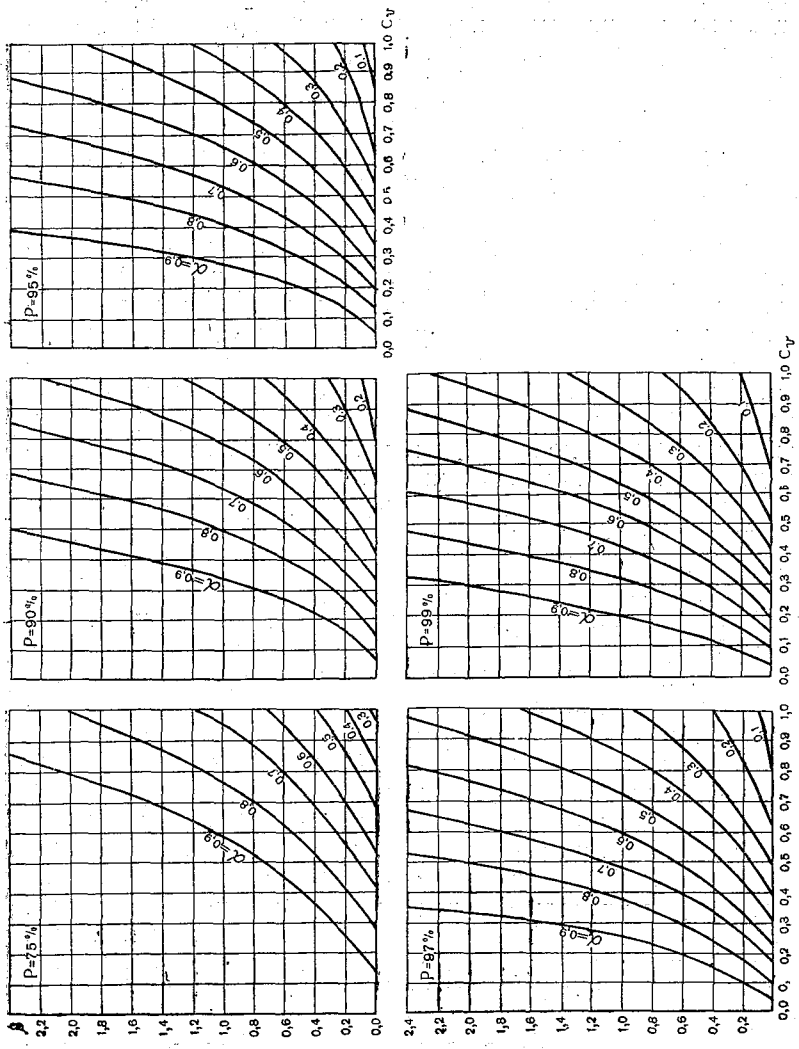


Рис. 12.6. Графики для расчета многолетнего регулирования с учетом связи между величинами стока смежных лет при  $r=0,30$  (составил И. В. Гуглий).

емкости 1,6 погрешность в определении емкости от неучета связи между величинами годового стока составляет 6,5%, а при изменчивости стока 0,80 той же обеспеченности 97% и многолетней емкости 1,2 — уже 25%. Графики Гуглия имеют значение при расчетах многолетнего регулирования стока рек засушливой зоны, где рассматриваемые коэффициенты корреляции достигают величины порядка 0,30, как раз учитываемой этими графиками.

## § 6. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЗОННОЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Изложенные выше методы расчета многолетнего регулирования стока, основанные на применении математической статистики или на обобщении результатов регулирования по эмпирическим данным (Г. П. Иванов), условно исходят из предположения о постоянстве в течение года поступающего к водохранилищу среднего годового расхода воды. Поэтому емкость водохранилища, необходимая для поддержания заданной отдачи в пределах расчетной обеспеченности и найденная по этим методам, представляет лишь часть емкости, а именно ее многолетнюю составляющую. Чтобы получить полную полезную емкость водохранилища, необходимую для осуществления многолетнего регулирования, надлежит определить еще вторую часть — сезонную составляющую.

Сезонная составляющая емкости водохранилища представляет ту добавку к многолетней, которая необходима в связи с внутригодовой неравномерностью стока. Она определяется приближенными способами независимо от многолетней составляющей емкости.

В основе расчета сезонной составляющей емкости лежит схема, предложенная С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем, согласно которой началу периода сработки многолетней емкости водохранилища предшествует год со стоком, равным отдаче. Такое предположение является вполне логичным, так как если бы предшествовал маловодный год по отношению к отдаче, потребовалась бы сработка многолетних запасов воды, т. е. год вошел бы в критический период; если бы предшествовал многоводный год, имели бы место избытки.

Внутригодовое распределение стока принимается упрощенно — год делится на две части. В одну из них выделяют период с расходами, превышающими отдачу (половодье), а в другую — период с расходами меньше отдачи (межень).

Расчетная схема представлена (рис. 13.6 а) интегральной кривой в координатах за критический маловодный период, в течение которого водохранилище, наполненное доверху



жени будем иметь:  $\alpha t_m$  — отдача и  $\alpha m^m$  — приток. Отсюда получим выражение для сезонной емкости водохранилища

$$\beta_{сез} = \alpha t_m - \alpha m^m = \alpha (t_m - m^m). \quad (17.6)$$

Аналогичным образом сезонную составляющую емкости водохранилища можно выразить и через соответствующие характеристики за половодный период.

Характеристики внутритрового распределения стока расценного года (1—2—3) устанавливаются по имеющимся гидрологическим данным применительно к годам, сток которых близок к регулируемой отдаче. При этом с целью исключения случайности эти характеристики нужно брать как средние за 3—5 лет.

Указанный прием определения сезонной составляющей емкости водохранилища при многолетнем регулировании оправдывался лишь при одинаковой изменчивости межлетнего и годового стока, а также при очень высоких степенях регулирования, когда основную роль играет многолетняя составляющая емкости. Во многих же случаях изменчивость межлетнего стока отличается от изменчивости годового стока, часто значительно превышая ее (в 1,5 раза и более), что при переходе к расчетной обеспеченности может привести к неправомерной оценке сезонной составляющей емкости. Для этих случаев С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [4] рекомендуют иметь в виду следующие.

Роль сезонной емкости водохранилища при внутритроговом регулировании неодинакова. В первом случае она является единственным источником покрытия дефицита стока за маловодный период; во втором случае дефицит покрытия емкости, сезонная составляющая которой равна лишь какой-то ее части. Это различие в условиях работы водохранилища требует и своего особого подхода к определению сезонной емкости.

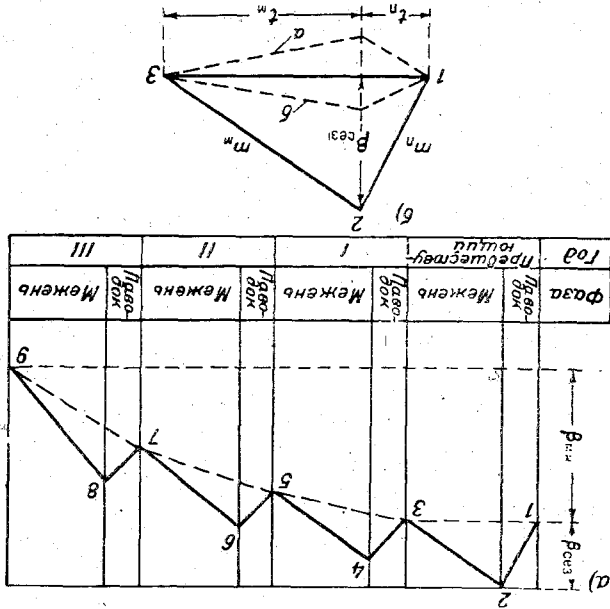
Если осуществляется только внутрогодовое регулирование, сток межени, определяющий в этом случае полную емкость водохранилища, должен соответствовать расчетной обеспеченности. При многолетнем же регулировании, когда имеется и многолетняя емкость, сохранение той же маловодности межени для определения сезонной составляющей емкости привело бы к преувеличению последней, поскольку вероятность сработки всего водохранилища по-прежнему должна соответствовать расчетной обеспеченности, между тем как вероятность совпадения маловодного периода в  $n$  лет с маловодной предшествующей меженью меньше, чем каждого из них, рассматриваемых отдельно. Поэтому для этих случаев степень маловодности межени, служащей для определения сезонной составляющей емкости

При равномерной в течение года отдаче  $\alpha$  для периода  $m_n + m_m = 1$ .

за период межени. Эти величины связаны условием  $t_n + t_m = 1$  и стока в долях от года за половойный период;  $t_m$  и  $m_m$  — то же  $1-2-3$  (рис. 13.6) обозначим:  $t_n$  и  $m_n$  — длительность и объем

На построенной интегральной кривой за расчетный год  $2-3$ ) и определяется сезонная составляющая емкости  $V_{сез}$ . сработки многолетней емкости, меженью которого (участок ния  $1-2-3$  характеризует сток года, предшествующего началу рию сработки многолетней емкости водохранилища  $V_{мн}$ . Ли- должны быть равны между собой, участок  $3-9$  отвечает не-

Рис. 13.6. Схема к расчету сезонной составляющей емкости водохранилища.  
 а — интегральная кривая за критический маловодный период, б — интегральная кривая за предшествующий год.



В конце паводка первого года (момент 2), полностью опорож- няется в конце периода (момент 9). На схеме ломаная линия  $1-3-5-7-9$  характеризует наполнения водохранилища при равномерном в каждом году притоке, а линия  $1-2-3-4-5-6-7-8-9$  — наполнения с учетом схематизированной внутри- головой неравномерности притока. Так как по принятому условию ординаты в моменты 1 и 3

Рассматриваемую вероятную длительность сработки можно определить методом кривых обеспеченности наполнений водохранилища. Начиная расчет с наполненной доверху емкости и производя построения кривых распределения вероятностей на протяжении водохранилища к концу первого, второго года и т. д., будем получать вероятности сработки водохранилища за один два... года его работы. Чтобы получить наиболее вероятный срок

емкости водохранилища. Ограничиваясь многолетними колебаниями стока, нужно иметь в виду длительность сработки многолетней составляющей лишь о ее наиболее вероятном значении.

Разом, нельзя говорить о какой-то определенной длительности в течение нескольких следующих лет за другим лет. Таким образом, например в течение года, в другом случае — наступления резкой маловодности может опорожниться сравнительно быстро, в течение которого наполненное доверху водохранилище полностью опорожнится. Одно и то же водохранилище в случае наступления маловодности может опорожниться сравнительно быстро, в течение которого наполненное доверху водохранилище полностью опорожнится. Одно и то же водохранилище в случае наступления резкой маловодности может опорожниться сравнительно быстро, в течение которого наполненное доверху водохранилище полностью опорожнится.

### Длительность периодов сработки водохранилищ

Дополнительно к характеристикам обеспеченности гарантированной отдачи и распределения вероятностей наполнения рассмотрим и другие очень важные элементы режима работы водохранилищ: длительности периодов сработки, характеристики

## § 7. НЕКОТОРЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМА РАБОТЫ ВОДОХРАНИЛИЩ

Приведенные в настоящем параграфе формулы совместно с графиками Лешкова, Иванова и др. дают возможность рассчитывать емкость водохранилища для осуществления сезонного или многолетнего регулирования, если известны: а) средний годовой сток; б) доля межennaleго стока в общем годовом; в) длительность межennaleго периода; г) коэффициент изменчивости межennaleго стока; д) коэффициент изменчивости годового стока.

$$V^{ces} = \beta^{ces} W.$$

Абсолютные размеры сезонной емкости водохранилища определяются как произведение

$$\beta^{ces} = a(at^n - m^n). \quad (21.6)$$

формулы, отражающий потребление. Например, формула (17.6), когда потребление неравномерно ( $a \neq 1$ ), пишется в таком виде:

в межень к средней головой отдаче  $\left( a = \frac{\sigma}{\sigma_m} \right)$  и вводимым в член быть учета коэффициентом  $a$  [14], равным отношению отдачи Эта неравномерность потребления воды внутри года может

13.6 б — пунктирная линия  $b$  — уменьшается. обратном соотношении отдачи за межень и полове (на рис. 13.6 а) — пунктирная линия  $a$ ) при повышении отдачи в межень по сравнению с равномерной за счет соответствующего понижения отдачи в полове по- требная сезонная емкость водохранилища увеличивается, а при

Нетрудно видеть, что (см. рис. 13.6 б) — пунктирная линия  $a$ ) при внутрогодовом регулировании чине потребной сезонной емкости как при многолетнем, так и вли- ющая на размеры многолетней емкости, сказывается на вели- чине потребной емкости водохранилища из года в год, не влия- ющая на размеры многолетней емкости, сказывается на вели- чине потребной сезонной емкости как при многолетнем, так и

года отдачи. Приведенные выше выражения для определения сезонной емкости водохранилища исходят из неизменяющегося в течение

$$(20.6) \quad \bar{m}^m = t^m - m^m.$$

примет вид сти водохранилища для этого крайнего случая регулирования  $\bar{m}^m$ , и выражение для определения сезонной составляющей емко- межи стремится к своему среднему многолетнему значению По мере приближения степени регулирования к  $a = 1$  сток

$$(19.6) \quad \bar{m}^m = at^m - \bar{m}^m + \bar{m}^m \frac{1 - K^m}{1 - K^m} (1 - a).$$

командуют определять по формуле Для случая регулирования с отдачи, колеб- лющейся в широком диапазоне (от  $a = K^m$  до  $a = 1$ ) сезонную со- ставляющую емкости водохранилища Крипкий и Менкель ре- определяют заданную обеспеченность.

В отличие от выражения (17.6), формулой (18.6) учиты- вается изменчивость межennaleго стока и расчет ведется на межennaleго стока с расчетной обеспеченностью.

Здесь (кроме уже известных величин)  $\bar{m}^m$  — средняя доля ме- жennaleго стока в общегодовом;  $K^m$  — модульный коэффициент

$$(18.6) \quad \bar{m}^m = at^m - \bar{m}^m K^m.$$

нилища следует определять по выражению На этом основании для случая сезонного регулирования, стока с расчетной обеспеченностью, сезонную емкость водохра- гостей должна устанавливаться в зависимости от глубины мно- голетнего регулирования.

(по выражению 23.6), и регулированием по очень продолжительным гидрологическим рядам рр. Немана (121 год) и Рейна (118 лет), показавшее весьма близкое совпадение. Именитые некоторые расхожения (табл. 4.6), естественно, являются результатом случайных отклонений в чередовании лет различной водности, которые наблюдаются по фактическим гидрологическим рядам.

Исследованием вопроса о длительности сработки водохранилищ, занимающихся другими авторами, в частности С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкер. В результате ими составлены графики [4], определяющие зоны наиболее благоприятные сработки водохранилищ для трех значений коэффициентов изменения объема стока  $C_p = 0,2, 0,4$  и  $0,6$ , которые могут служить для расчетных целей (рис. 14.6). Как можно видеть из приведенных данных, длительность сработки водохранилищ увеличивается с повышением  $\alpha$ , выплеском глубины регулирования (с повышением  $\beta$ ), а с ним и  $\beta$ .

### Характеристика педобоев

При длительной эксплуатации водохранилища без перебойной подачи воды потребителям, как известно, гарантируется с наперед заданной обеспеченностью. За пределами этой обеспеченности вследствие исчерпания запасов воды водохранилища наступает педобой, т. е. ограничение водоупотребления. Указанные ограничения, характеризующиеся глубиной и длительностью, зависят от характера осушаемого регулируемого стока и степени гарантии.

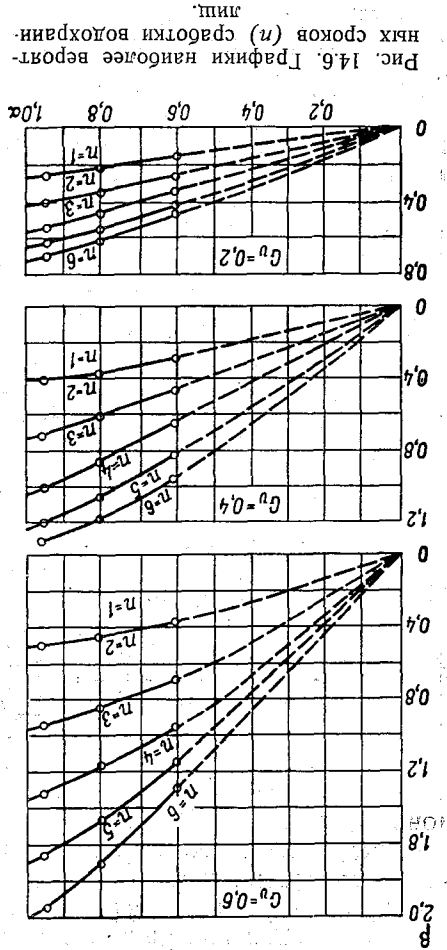


Рис. 14.6. Графики наиболее вероятных сроков ( $n$ ) сработки водохранилищ.

Коэффициент регулирования по Иванову $\alpha$		р. Неман	р. Рейн	р. Неман	р. Рейн
1	1-0,2 C <sub>2</sub>	по графикам с учетом C <sub>s</sub>		по гидрологическим рядам	
15	1-0,5 C <sub>2</sub>	50	50	54	40
8	1-1,0 C <sub>2</sub>	15	15	13	19
2	1-1,5 C <sub>2</sub>	8	8	5	4
1		3	3	2	3
		1	1	1	2
Длительность сработки, в годах					

Таблица 4.6

Г. П. Ивановым было проведено сопоставление длительностей периодов сработки водохранилищ, установленных по графикам

(23.6)

$$\frac{\Delta V}{\Delta S} = n$$

Здесь  $n$  и есть искомая длительность (в годах) периода сработки водохранилища с отдачи  $\alpha W$ . Таким образом,

$$n = \frac{\Delta V}{\Delta S}$$

откуда

$$\Delta V = \Delta S n$$

Совершенно ясно, что величины  $\Delta V$  и  $\Delta S$  связаны между собой равенством  
 где  $\Delta V$  — приращение многолетней емкости водохранилища;  $\Delta S$  — приращение годовой отдачи.

$$(22.6) \quad \frac{\Delta V}{\Delta S} = \frac{\xi_1 - \xi_2}{\xi_1 - \Phi_2} = \frac{\frac{WC_2}{V_1} - \frac{WC_2}{V_2}}{\frac{V_1 - V_2}{V_1} - \frac{C_2}{V_1 - \alpha_1 W} - 1} = \frac{C_2}{V_1 - V_2} \frac{V_1 - \alpha_2 W}{V_1 - \alpha_1 W} = \frac{\Delta V}{\Delta S}$$

В самом деле,

величины  $\xi$   
 10.6) или  $C_s$  (см. рис. 11.6) в точке заданной или найденной  
 ина тангенса угла наклона касательной к изолинии  $p$  (см. рис.  
 По графикам Иванова, например, берется численная вели-  
 чина тангенса угла наклона касательной к изолинии  $p$  (см. рис.  
 10.6) или  $C_s$  (см. рис. 11.6) в точке заданной или найденной  
 величины  $\xi$   
 Наиболее вероятную длительность сработки водохранилища  
 можно получить также и по графикам Плешкова, Иванова и др.  
 дать искомый срок.  
 номер) при начале расчета с наполненного водохранилища и  
 распределения. Стабилизировавшаяся кривая (ее порядковый  
 плутации, необходимо расчет довести до стабилизации кривой  
 опорожнения водохранилища в условиях длительной его экс-

Выполненные исследования этих вопросов показывают [4], что наиболее часто повторяющимися являются перебои в течение 1 года, или так называемые одноразовые перебои. Однако при многолетнем регулировании вероятность повторения перебоа значительно повышается с увеличением глубины регулирования. При очень высоких коэффициентах регулирования ( $\alpha = 0,9$  и выше) почти две трети перебойных лет наступает не поодиночке, а по два и более подряд. Это показывает, что режиму емких водохранилищ свойственно такое положение, когда длительные периоды работы с нормальной отдачей сменяются целыми группами лет работы с ограничениями.

Другой характеристикой служит глубина перебоев, т. е. количество недоданной потребителям воды или, иначе говоря, дефицит в подаче воды  $D$  по отношению к нормально регулируемой отдаче  $\alpha$ .

Глубина перебоев возрастает с повышением коэффициента регулирования и степени гарантии. Так, например, при обеспеченности 95% и осуществлении только внутригодового регулирования (многолетняя емкость водохранилища равна нулю) средний дефицит в подаче воды за перебойный период составляет лишь 2%, в то время как при доведении коэффициента регулирования до  $\alpha = 0,8$  и обеспеченности до 99% средний для всего перебойного периода объем дефицита достигает уже 13% [4].

Характерным для перебоев является также и то, что из возможного общего количества перебоев значительная часть их имеет небольшие дефициты и лишь очень ограниченное число случаев — большие дефициты, достигающие 50% и более. Однако, принимая во внимание, что суммарное количество перебойных лет в общей длительности работы водохранилища очень мало, например 5 из 100 — при обеспеченности 95% или 1 из 100 — при обеспеченности 99%, случаи с большими дефицитами следует рассматривать как явления крайне редкие, и ими можно пренебрегать в практических расчетах. Это свидетельствует о высокой степени надежности работы водохранилищ, рассчитанных на обеспеченность 95% и выше.

Характеристика режима работы водохранилища в условиях перебоев может быть получена построением кривой обеспеченности отдачи в перебойной зоне, используя для этого метод А. Д. Саваренского (см. § 3) или способ, изложенный ниже.

По Саваренскому эта кривая получается путем однократного сложения стабилизовавшейся кривой распределения вероятностей наполнений водохранилища с кривой обеспеченности стока за вычетом отдачи. При этом, в отличие от ранее выполнявшихся расчетов по построению кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища, в данном случае суммирование надо производить и в дефицитной зоне, т. е. в области

отрицательных ординат кривой (рис. 15.6 а). Отрицательные ординаты кривой обеспеченности наполнений водохранилища и характеризуют абсолютные величины дефицитов (глубины перебоев). Уменьшая затем на эти дефициты при соответствующих обеспеченностях гарантированную отдачу, получим ординаты

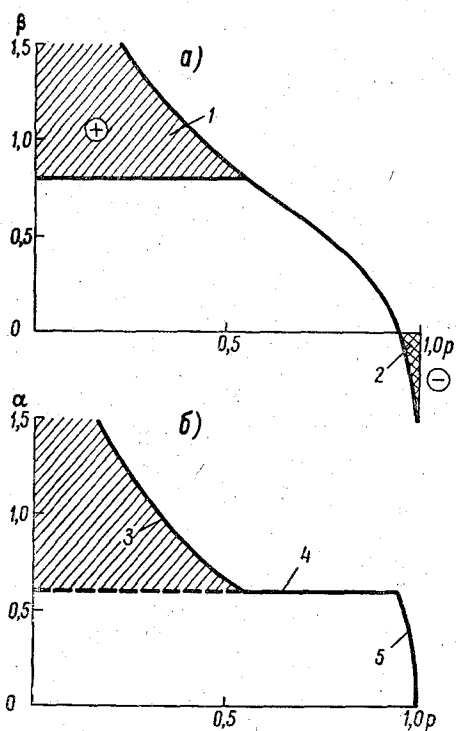


Рис. 15.6. Кривые обеспеченности наполнений водохранилища (а), отдачи и сбросов (б).

1 — избытки, 2 — дефицит, 3 — сбросы, 4 — гарантированная отдача, 5 — перебойная отдача.

сти  $p$  задается условиями регулирования, а за ее пределами — указанным ниже способом.

По истечении критического периода, за который полностью сработается водохранилище, перебой в гарантированной отдаче наступит при появлении маловодного года или группы маловодных лет. Глубина перебоя, как видно из изложенного, будет зависеть от маловодности этих лет.

Непосредственно после сработки водохранилища равновероятно появление любого года — от крайне маловодного до крайне многоводного. Но в данном случае интерес представляют лишь годы, сток которых меньше  $\alpha$ , находящиеся на кривой

участка (5) кривой обеспеченности отдачи в перебойной зоне (рис. 15.6 б).

Применение другого из упомянутых способов для решения той же задачи установления характеристик отдачи в перебойной зоне основывается на следующих предположениях.

При сезонном регулировании величины отдачи за пределами расчетной обеспеченности должны устанавливаться по стоку лет, взятых с кривой обеспеченности естественного стока, поскольку работа водохранилища замыкается внутри каждого года и на смежные годы влияния не оказывает. При многолетнем же регулировании величины отдачи за пределами расчетной обеспеченности должны устанавливаться по кривой обеспеченности, отражающей работу водохранилища в течение длительного времени. Эта кривая в пределах расчетной обеспеченности



обеспеченности стока (кривая 1 на рис. 16.6) от  $p_\alpha$  до 1. Если этот участок кривой отнести к основанию, равному вероятности перебойных лет  $1-p$ , и пристроить его к заданной кривой обеспеченности отдачи, получим полную кривую обеспеченности отдачи (кривая 3), включающую и перебойную зону.

Глубина перебоев (дефицитов  $D$ ) по ней определится как разность между гарантированной отдачей  $\alpha$  и отдачей в перебой-

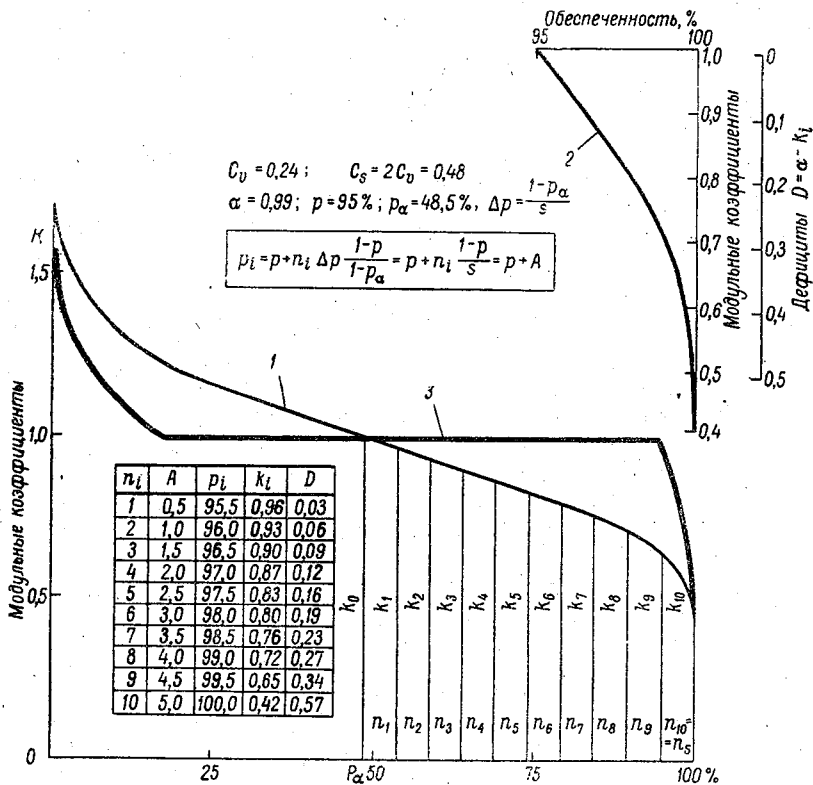


Рис. 16.6. Схема расчета кривой обеспеченности отдачи в зоне перебоев.

ные годы с обеспеченностью за пределами расчетной (рис. 16.6, 2).

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

$$p_i = p + n_i \Delta p \frac{1-p}{1-p_\alpha} = p + n_i \frac{1-p}{s}, \quad (24.6)$$

где  $p$  — расчетная обеспеченность гарантированной отдачи;  $p_i$  — обеспеченность сниженной отдачи за пределами гарантии;  $\Delta p = \frac{1-p_\alpha}{s}$  — интервал участка кривой  $1-p_\alpha$ , разделенного на  $s$  равных интервалов;  $n_i$  — номер интервала, считая от  $p_\alpha$ .

### Характеристика сбросов

Выше мы определили характеристики работы водохранилища в перебойной зоне и наметили приемы их расчета. Дальнейшей задачей будет выяснение характеристик режима работы водохранилища в условиях избыточного стока.

Подобно тому как перебои могут наступить лишь в результате неблагоприятного хода стока после полного опорожнения водохранилища, сбросы могут иметь место лишь в результате появления избыточного стока после заполнения всей полезной емкости водохранилища.

Оценить вероятность появления сбросов и их величины можно тем же методом А. Д. Саваренского одновременно с расчетом перебойной зоны. Для этого суммирование стабилизировавшейся кривой распределения вероятностей наполнений водохранилища с кривой обеспеченности стока, вычитая при этом отдачу, нужно производить, не ограничиваясь дефицитной зоной, также и в зоне избытков, т. е. как бы переполняя водохранилище (участок  $I$  на рис. 15.6 а). Затем участок кривой с избыточным наполнением водохранилища переносится на кривую обеспеченности отдачи путем добавления к гарантированной отдаче избытков наполнения при соответствующих обеспеченностях. В результате будет получен участок кривой обеспеченности, характеризующий работу водохранилища в зоне избытков (участок  $3$  на рис. 15.6 б).

### § 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТДАЧИ НЕТТО

Расчеты регулирования стока, как уже отмечалось, производятся по полным расходам, изымаемым из водохранилища, или расходам брутто, которые включают не только полезно используемую потребителями воду (расходы нетто), но и потери на испарение, фильтрацию и т. п.

Способы учета потерь и определения отдачи нетто в расчетах регулирования по календарным стоковым рядам были изложены в главе 5. Здесь остановимся на вопросе определения отдачи нетто в расчетах регулирования стока обобщенными статистическими методами.

При определении отдачи нетто следует различать периоды, в пределах которых поддерживается отдача на уровне гарантированной, и периоды с отдачей, превышающей ее. Периоды.

с повышенной отдачей обычно заканчиваются наполнением водохранилища до НПГ и сбросом излишков воды. Периоды же, когда поддерживается гарантированная отдача, обычно заканчиваются опорожнением водохранилища до ГМО и далее возможно наступление перебоев.

В расчетах отдачи нетто основной интерес представляет период работы водохранилища на гарантированном режиме, поскольку именно им лимитируется водопотребление. Поэтому потери воды, найденные из условий работы водохранилища в критический период сработки, обычно распространяются также и на все остальное время работы водохранилища.

Потери воды зависят от наполнения водохранилища, потому что им определяется положение уровня, а отсюда и площадь водного зеркала и напор, удерживаемый сооружениями. Наполнение же водохранилища зависит от отдачи брутто, которая заранее неизвестна, поскольку заданными являются лишь требования потребителей, т. е. отдача нетто. Поэтому расчет потерь приходится выполнять последовательным приближением.

Первоначально наполнения водохранилища определяются исходя из приближенно задаваемой отдачи брутто и по ним находят потери. Вычитанием из суммарной отдачи брутто за период критической сработки водохранилища суммарных потерь находится суммарная отдача нетто, а затем и среднее ее значение. Повторные расчеты регулирования производятся при новой отдаче брутто, получаемой как сумма средней отдачи нетто и первоначально вычисленных потерь. На базе выполненного расчета уточняются потери, и, следовательно, отдача нетто, и на этой основе производится окончательное регулирование.

Для расчета потерь и отдачи нетто, помимо емкости водохранилища и отдачи брутто, разумеется, нужно знать длительность и сток критического периода сработки водохранилища. Так как при многолетнем регулировании длительность критического периода сработки водохранилища состоит из межени года, предшествующего началу сработки многолетней емкости и периода сработки многолетней емкости в  $n$  целых лет, в расчетах необходимо учитывать обе составляющие периода.

Когда имеется гидрологический ряд, включающий критический период сработки водохранилища, расчеты отдачи нетто производятся по этим данным. Если же отсутствуют наблюдения, длительность сработки многолетней емкости водохранилища устанавливается по одному из способов, рассмотренных в предыдущем параграфе. Длительность предшествующей межени находится в соответствии с имеющимися данными по внутригодовому распределению стока.

Затем следует установить сток за период сработки водохранилища. Он определяется простейшим расчетом, основанным на балансировании объемов воды.

Обозначим годовую отдачу брутто  $A_r$ , длительность межени  $t_m$  (в долях от года) и длительность опорожнения многолетней емкости  $n$ . Тогда отдача брутто за весь критический период сработки водохранилища составит  $A_r(n+t_m)$ , а за период  $n$  равна  $A_r n$ . Отсюда, зная сезонную составляющую емкости  $V_{сез}$  и многолетнюю  $V_{мн}$ , получим сток за предшествующую межень  $M = A_r t_m - V_{сез}$ , а средний годовой сток за период  $n$  лет

$$\Gamma = \frac{A_r n - V_{мн}}{n} = A_r - \frac{V_{мн}}{n}. \quad (25.6)$$

Эти данные и могут служить гидрологической основой для периода сработки водохранилища емкостью  $V = V_{мн} + V_{сез}$ .

Остается учесть внутригодовую неравномерность стока, которая принимается по типовым гидрографам, характерным для рассматриваемой реки, или методом аналогии.

Изложенная выше схема расчета отдачи нетто в основном применяется в тех случаях, когда потери занимают значительную долю в общей отдаче. При малом весе потерь отдача нетто определяется упрощенным способом путем оценки потерь по площади зеркала, отвечающей среднему наполнению водохранилища за критический период его сработки. По опытным данным, среднее наполнение водохранилища за критический период близко к  $0,5 V$ , а при глубоком многолетнем регулировании —  $0,4 V$ .

В заключение остановимся на вопросе о зависимости, связывающей отдачу нетто с емкостью водохранилища.

В главе 5 было показано, что отдача брутто с увеличением емкости в начале резко возрастает, а затем приращение отдачи затухает с приближением коэффициента регулирования к единице. При больших значениях емкости водохранилища кривая зависимости  $\alpha = f(V)$  обращается в асимптоту.

При малом весе потерь аналогичный характер имеет и зависимость отдачи нетто от емкости, и величины  $\alpha$  для соответственных значений  $V$  получаются несколько меньше за счет потерь. Если же потери значительны, возможно более быстрое нарастание потерь по сравнению с нарастанием отдачи брутто при увеличении емкости (значительного возрастания напора и площади зеркала водохранилища). В таком случае зависимость

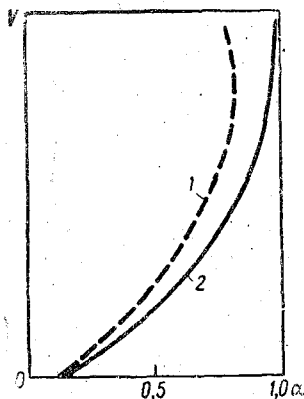


Рис. 17.6. Зависимость между емкостью водохранилища и отдачей брутто и нетто.  
1 —  $\alpha_{нет}$ , 2 —  $\alpha_{бр}$ .

$\alpha_{\text{нет}} = f(V)$  будет иметь максимум (рис. 17.6), свидетельствующий о неэффективности увеличения емкости водохранилища в данных конкретных условиях сверх некоторой определенной величины из-за возникающих при этом больших потерь воды.

#### Литература

1. Потапов М. В. Регулирование стока. Сочинения. т. III, Сельхозгиз, М., 1951.
2. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Расчеты многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятности. Труды ВИСУ, Гидротехнический сборник, № 4, 1932.
3. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Многолетнее регулирование стока. Гидротехническое строительство, № 11, 1935.
4. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1952.
5. Плешков Я. Ф. Быстрый и точный расчет водохранилищ. Гидротехническое строительство, № 6, 1939.
6. Hazen A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply Transactions of A. S. C. E., 1914.
7. Иванов Г. П. Метод расчета многолетнего регулирования стока. Труды Первого совещания по регулированию стока, изд. АН СССР, 1946.
8. Саваренский А. Д. Метод расчета регулирования стока. Гидротехническое строительство, № 2, 1940.
9. Рыбкин С. И. Эмпирические формулы и номограммы для расчета многолетнего регулирования стока. Гидротехническое строительство, № 1, 1938.
10. Ефимович П. А. Вопросы водохозяйственных расчетов и гидрологии. ОНТИ, М., 1936.
11. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. О приемах исследования случайных колебаний речного стока. Труды НИУ ГУГМС, серия IV, вып. 29, 1946.
12. Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеиздат, Л., 1959.
13. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом коррелятивной связи между стоком смежных лет. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI. Гидрометеиздат, Л., 1959.
14. Бахтиаров В. А. Расчеты компенсированного многолетнего регулирования стока на основе метода Г. П. Иванова. Труды ЛГМИ, вып. 4, 1956.
15. Гуглий И. В. Современные способы расчета емкости водохранилищ многолетнего регулирования. Сб. «Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока». АН СССР, 1960.

## ГЛАВА СЕДЬМАЯ

### РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО КАЛЕНДАРНЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЯДАМ НА ПЕРЕМЕННУЮ ОТДАЧУ. ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ВОДОХРАНИЛИЩ

#### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В главе 5 были рассмотрены простейшие задачи регулирования стока и приемы их решения на основе календарных гидрологических данных с помощью интегральных кривых, табличным способом и др.

Ниже излагаются общие задачи регулирования и методы их расчета на базе тех же гидрологических данных.

Простейшие задачи регулирования, как известно, характеризуются постоянством во времени потребляемого расхода воды. В современной же практике водохозяйственного использования большое распространение получили задачи, когда потребляемый расход изменяется во времени, повышаясь при больших наличных запасах воды в водохранилище и большом притоке в него и понижаясь при малых запасах воды и малом притоке.

Возможность реализации переменного расхода воды определяется различными причинами. Первая из них заключается в том, что при комплексном использовании водотока в состав потребителей обычно входят предприятия или целые отрасли народного хозяйства, требующие воду с различной обеспеченностью. В этом случае основной задачей регулирования становится поддержание гарантированной отдачи для наиболее ответственного потребителя, т. е. с наиболее высокой обеспеченностью. Водоотдача остальным потребителям осуществляется с меньшей обеспеченностью (подробно см. гл. 8). Другой причиной является работа водохозяйственной установки в системе с другими взаимозаменяемыми источниками воды или энергии. В таких случаях при повышении отдачи одного источника понижается отдача другого.

источника, чем поддерживается равновесие отдачи по системе в целом.

Типичными установками с переменной отдачей являются гидроэлектрические станции, вливающие свою энергию в энергетическую систему. Обычным для указанных ГЭС будет поддержание в маловодные периоды гарантированной мощности с повышением ее в периоды избыточного стока до максимально возможной (установленной, см. гл. 9).

Переменная отдача из водохранилища может быть реализована также и при воднотранспортном и отчасти ирригационном использовании водотока. Водный транспорт, например, ориентируется в основном на величину гарантированного расхода и определяемому им гарантийную глубину судового хода, может эффективно использовать повышенные расходы и глубины, осуществляя операции по перевозкам (грузов и пассажиров) с большей загрузкой судов при большей их осадке. При ирригационном использовании повышенную водоотдачу из водохранилища можно реализовать на увеличение поливных норм наиболее влаголюбивых растений для повышения урожайности.

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

Пусть водохранилищем обеспечивается минимальная величина зарегулированного расхода  $Q_p$ , а максимальная производительность потребляющих воду установок равна  $Q_v$ . Тогда полезно реализуемая отдача будет заключена в диапазоне от  $Q_p$  до  $Q_v$ . Попробуем составить план работы этого водохранилища, позволяющего с наибольшим эффектом использовать ресурсы водотока. Очевидно, задачей такого плана будет обеспечение подачи  $Q_p$  с заданной обеспеченностью  $p$  и наиболее полное общее использование стока реки. Такой план регулирования при известном ходе стока за длительный период можно наметить, применяя так называемую схему регулирования на наибольшее выравнивание стока, излагаемую в § 2.

## § 2. СХЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НА НАИБОЛЬШЕЕ ВЫРАВНИВАНИЕ СТОКА

Схемой регулирования на наибольшее выравнивание стока называют такой режим работы водохранилища заданной емкости, при котором минимум зарегулированного расхода достигает наибольшего возможного значения, а максимум — наименьшего. Одновременно требуется, чтобы число градаций зарегулированных расходов внутри найденного диапазона от минимума до максимума было доведено до наименьшего значения. Иначе говоря,

эта схема регулирования дает представление о теоретически возможном предельном выравнивании стока, достигаемом при тех или иных размерах полезной емкости водохранилища.

Сущность построения такой схемы сводится к следующему.

Пусть будет задан сток за некоторый период времени в виде интегральной кривой в косоугольных координатах (рис. 1.7, кривая 1) и размеры полезной емкости водохранилища  $V$ .

На расстоянии по вертикали, равном емкости водохранилища, построим контрольную интегральную кривую, параллельно ос-

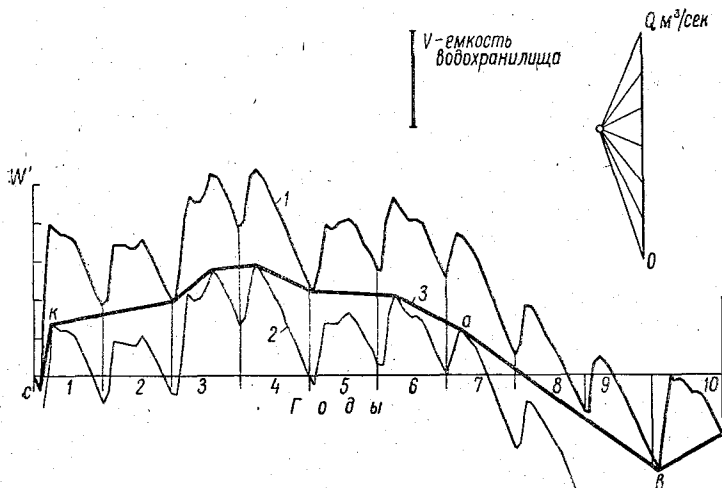


Рис. 1.7. Расчеты многолетнего регулирования по схеме на наибольшее выравнивание стока.

Интегральные кривые естественного стока (1), контрольная (2) и зарегулированного (3) стока.

новой и вниз от нее. Внутри поля, жестко ограниченного очертаниями интегральных кривых, проведем касательные к максимумам нижней и минимумам верхней кривых при сработке водохранилища и к минимумам верхней и максимумам нижней кривых при его наполнении. Следуя принципу наибольшего выравнивания стока, необходимо стремиться к тому, чтобы в сработку и наполнение водохранилища каждый раз включались как можно более длительные периоды. Это означает, что при проведении той или иной касательной точки касания ее с интегральными кривыми должны быть удалены друг от друга на максимальное расстояние, какое допускается в данных условиях (т. е. пропуская рядом расположенные минимумы и максимумы и исключая пересечение интегральных кривых).

Нетрудно видеть, что наклон касательной  $ab$ , проведенной в пределах наиболее длительного и глубокого маловодья, соот-



ветствует минимальному зарегулированному расходу  $Q_p$ , который при заданных размерах водохранилища является наибольшим из возможных в периоды маловодья. Наклон касательной  $sK$ , проведенной в пределах наиболее многоводного периода времени, соответствует максимальному зарегулированному расходу  $Q_{\max}$ , который при заданных размерах водохранилища является наименьшим из возможных в период многоводья. Наклон остальных касательных характеризует промежуточные значения зарегулированных расходов — между минимальным  $Q_p$  и максимальным  $Q_{\max}$ .

Непрерывная цепь касательных, обозначенная на рис. 1.7 индексом  $\mathcal{J}$ , и представляет собой искомую линию (интегральную кривую) зарегулированных расходов по схеме на наибольшее выравнивание стока.

Эту же задачу можно решить и несколько иным путем.

В выступающих точках верхней (минимумах) и нижней (максимумах) интегральных кривых  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $K$ ... наколем булавки, по которым натянем тонкую нить с наименьшим количеством изломов. Очевидно, натянутая указанным способом нить совпадет с ранее проведенными касательными и, следовательно, получим решение, одинаковое с предыдущим. Поэтому изложенный прием построения зарегулированного режима по схеме на наибольшее выравнивание стока называется «правилом натянутой нити».

В примере, показанном на рис. 1.7, проведены расчеты по схеме на наибольшее выравнивание стока при многолетнем регулировании. Таким же путем аналогичная задача решается и при сезонном регулировании стока.

Построив контрольную интегральную кривую  $2$  на расстоянии заданной емкости водохранилища (рис. 2.7), по-прежнему будем проводить касательные к нижней и верхней интегральным кривым ( $ab$ ) — при сработке водохранилища в маловодную часть года и к верхней и нижней кривым ( $sK$ ) — при наполнении водохранилища в многоводную часть года. В результате получим непрерывную линию зарегулированных расходов, которая в пределах интервалов времени работы водохранилища при сработанной емкости ( $be$ ) совпадает с верхней интегральной кривой, а в пределах интервалов времени при доверху заполненном водохранилище ( $Ka$ ) — с нижней интегральной кривой.

В отличие от задач регулирования, когда независимо от состояния наполнения водохранилища и притока к нему регулируется постоянный расход  $Q_p$  (глава 5), вследствие чего полная сработка водохранилища наступает крайне редко, в данной схеме, предусматривающей при сезонном регулировании ежегодную сработку (и наполнение) емкости, минимальный зарегулированный расход  $Q_p$  имеет место лишь в наиболее маловодном по межени году (год 7), а в остальных годах зарегулированный рас-

ход при сработке водохранилища  $Q > Q_p$ . Максимальный зарегулированный расход при наполнении водохранилища  $Q_{\text{макс}}$  получается в наиболее многоводном по половодью году (год 1), а в остальных годах  $Q < Q_{\text{макс}}$ .

В отношении получаемого максимального зарегулированного расхода как при многолетнем, так и при сезонном регулировании, если  $Q_{\text{макс}} > Q_b$ , рассматриваемая схема имеет отвлеченный смысл, так как допускает холостые сбросы с самого начала заполнения полезной емкости водохранилища, что нерационально. В таком случае, очевидно, необходимо внести корректив, по ко-

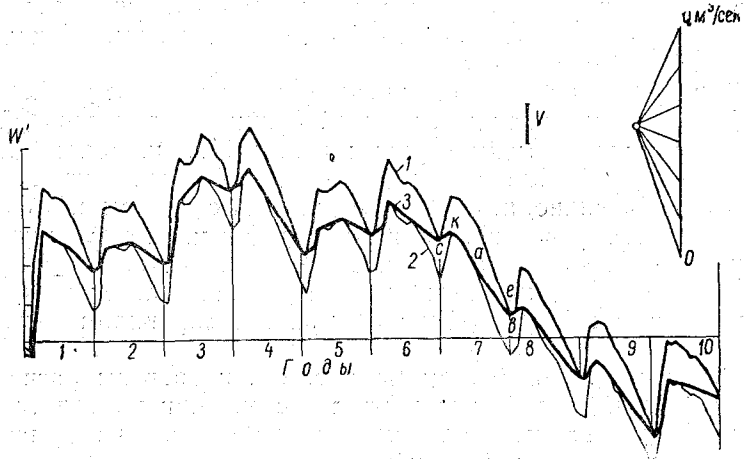


Рис. 2.7. Расчеты сезонного регулирования по схеме на наибольшее выравнивание стока.

Интегральные кривые естественного стока (1), контрольная (2) и зарегулированного (3) стока.

торому в период наполнения водохранилища величина максимального регулируемого расхода должна задаваться не более расхода максимальной производительности водопотребляющих установок  $Q_b$ , и только после заполнения водохранилища осуществляются холостые сбросы, когда приточные расходы превышают  $Q_b$ . При регулировании на расход  $Q_b < Q_{\text{макс}}$  заполнение полезной емкости водохранилища будет происходить в более короткие сроки, чем при регулировании на расход  $Q_{\text{макс}}$ , что отвечает более правильному ведению водного хозяйства, особенно при энергетическом использовании, если водохранилище является верхним бьефом и его уровнями определяются действующие напоры ГЭС.

С учетом указанного корректива рассмотренная схема, которую также можно назвать схемой регулирования на гибкий гра-

фик потребления, даже при низких значениях  $\alpha$  обеспечивает высокое общее использование стока, в то время как схема регулирования на постоянную отдачу  $\alpha$  характеризуется более низким использованием стока.

Действительно, при регулировании по последней схеме величина гарантированного расхода  $Q_p$  определяется по стоку заданной обеспеченности; поэтому при повышенном притоке в период сработки водохранилища оно окажется неполностью опорожненным к началу многоводной части следующего водохозяйственного года (сезонное регулирование) или к началу многоводного периода, следующего за маловодным (многолетнее регулирование). Объем воды, оставшийся в несработанной части емкости, будет потерян при наполнении водохранилища и на столько же будут увеличены холостые сбросы.

Схема регулирования на наибольшее выравнивание стока, несмотря на большие достоинства, имеет главным образом теоретическое значение, так как исходит из условия, что предстоящий ход стока известен заранее. Практическое претворение в жизнь этой схемы в условиях реальной эксплуатации водохранилища невозможно вследствие отсутствия сведений о предстоящем на длительный срок вперед ходе стока.

### § 3. ФОРМЫ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ГРАФИКОВ И ПРИНЦИПЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ

Как можно заключить из вышеизложенного, при наличии точного предвидения стока в хронологической последовательности всегда можно составить такой план работы водохранилища, который бы удовлетворял требования всех прикрепленных к водохранилищу потребителей в меру имеющихся водных ресурсов. При этих условиях оказалось бы возможным заблаговременно опорожнять водохранилище перед наступлением многоводных периодов и экономить воду в ожидании маловодья, т. е. производить регулирование, подобное схеме на наибольшее выравнивание стока (§ 2). Эффект работы водохранилища в этом случае был бы наибольшим.

Практически, однако, прогнозирование стока, не считая предвидения типичного его внутригодового распределения, ограничивается небольшой заблаговременностью и сравнительно невысокой точностью; в силу чего теоретически возможный эффект работы водохранилища не поддается полной реализации. Поэтому отсутствие конкретного знания притока приходится возмещать составлением специальных правил управления работой водохранилищ, воплощенных в диспетчерские графики.

Диспетчерские графики строятся на основе анализа работы водохранилища в условиях гидрологического режима, охвачен-

ного наблюдениями за предшествующий период и, следовательно, ими учитываются свойственные каждому водотоку особенности. За основной аргумент в диспетчерских графиках принимается достигнутое наполнение водохранилища, в зависимости от которого и производится подача воды потребителям. При эксплуатации водохранилища используются также данные текущих прогнозов, которые позволяют корректировать даваемые диспетчерскими графиками решения и тем самым способствуют повышению эффекта регулирования.

В задачу диспетчерских графиков входит обеспечение получения как можно большего эффекта от водохранилища в реальной обстановке с учетом возможного предвидения стока. К числу основных показателей, определяющих наибольший эффект работы водохранилища, необходимо отнести бесперебойную в пределах расчетной обеспеченности  $p$  подачу потребителям гарантированного расхода  $Q_p$  и максимальное общее использование стока.

Обычно диспетчерские графики строятся в координатах время (ось абсцисс) — наполнение водохранилища (объем или высотная отметка горизонта — ось ординат). Эта форма графиков является основной и наиболее полной, так как ими регламентируется подача воды из водохранилища в различных условиях водности: нормальной, повышенной и пониженной.

Весьма часто в практике находит применение и другая форма диспетчерских графиков — в координатах величин зарегулированных расходов (ось абсцисс) и наполнений водохранилища (ось ординат). Однако такого рода графики строятся лишь для регламентирования расходования избытков воды, образующихся в водохранилище, в связи с поступлением притока, превышающего расчетный.

Диспетчерские графики, построенные в координатах время — наполнение водохранилища, представлены рядом линий, разграничивающих зоны, в пределах которых водопотребителю подается определенный расход (рис. 3.7 а — в). На этих графиках выделяются следующие зоны работы водохранилища:

1. Гарантированной отдачи  $Q_p$  [или при многоступенчатом плане (см. ниже) соответствующие значения ее].
2. Повышенной отдачи в диапазоне  $Q_b > Q > Q_p$ .
3. Полной повышенной отдачи  $Q_b$ .
4. Урезанной (ограниченной) отдачи  $Q < Q_p$ .

Диспетчерские графики в координатах расход — наполнение водохранилища состоят из серии лучей, идущих от вертикальной линии с абсциссой, равной гарантированному расходу (рис. 3.7 г). Каждый из указанных лучей связывает наполнение водохранилища на контрольную дату, например на 1-е число месяца, с величиной расхода, подаваемого водопотребителю в течение последующего интервала времени до следующей контрольной

даты. На диспетчерских графиках рассматриваемой формы, по существу, выделяются три зоны: гарантированная, повышенная и полная повышенная отдача.

Линиями, разграничивающими на диспетчерских графиках

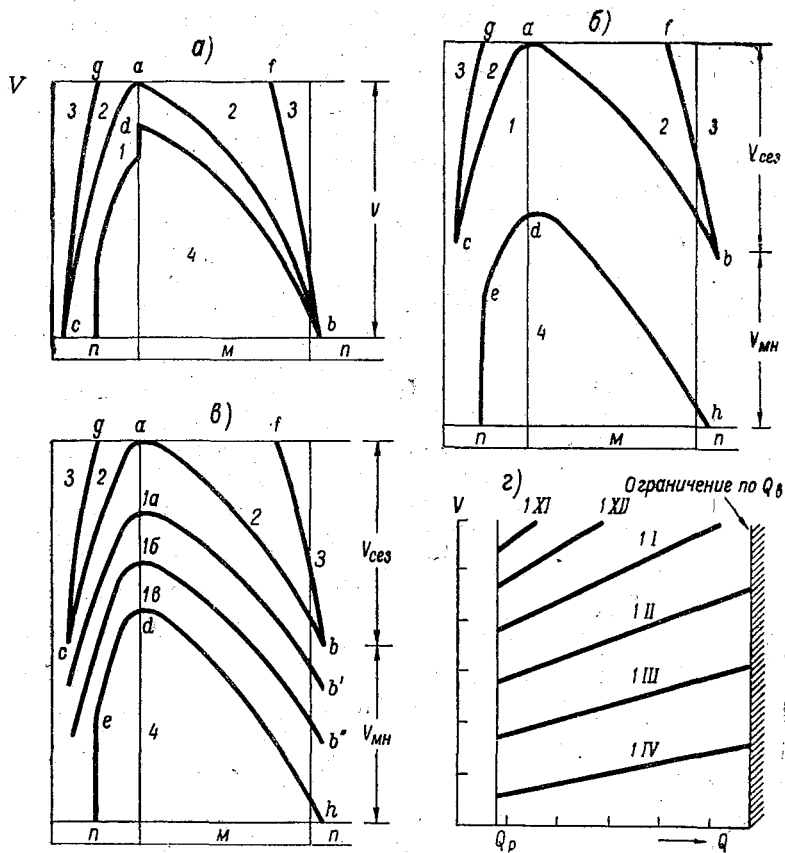


Рис. 3.7. Схемы диспетчерских графиков.

*a* — сезонного регулирования, *б* — многолетнего регулирования при одной ступени гарантированной отдачи, *в* — многолетнего регулирования при трех ступенях гарантированной отдачи, *г* — регламентирование использования избытков.

в координатах время — наполнение основных зон сработки водохранилища, являются:

А. Верхняя противоперебойная, отделяющая зону гарантированной отдачи  $Q_p$  от зоны повышенной отдачи в диапазоне  $Q_B > Q > Q_p$ .

Б. Нижняя противоперебойная, отделяющая зону гарантированной отдачи  $Q_p$  от зоны урезанной отдачи  $Q < Q_p$ .

В. Противосбросовая, отделяющая зону повышенной отдачи от зоны полной повышенной отдачи  $Q_v$ .

Каждая из указанных линий состоит из двух ветвей: напoлнения и опорожнения (сработки) водохранилища.

В соответствии с условиями работы водохранилища при сезонном и многолетнем регулировании, когда в первом случае цикл наполнения и опорожнения водохранилища замыкается в пределах одного года, а во втором — в пределах ряда лет, положение верхней противоперебойной линии на диспетчерских графиках будет различным. При сезонном регулировании эта линия располагается в пределах всей полезной емкости водохранилища, а при многолетнем — лишь в пределах сезонной составляющей, поскольку только эта часть емкости предназначается для ежегодной предполоводной сработки. Нижняя противоперебойная линия при сезонном регулировании также располагается в пределах всей емкости водохранилища, а при многолетнем регулировании в основном в пределах многолетней составляющей.

Ветвь наполнения верхней противоперебойной линии при сезонном регулировании (рис. 3.7 а, линия *ca*) строится с целью обеспечения заполнения к концу половодья всей полезной емкости водохранилища в маловодные расчетные годы. Та же ветвь наполнения верхней противоперебойной линии при многолетнем регулировании (рис. 3.7 б, линия *ca*) строится с целью обеспечения к концу половодья заполнения сезонной составляющей емкости в году, предшествующем критическому маловодью, в течение которого срабатывается многолетняя составляющая емкости (*bh*).

Ветвь наполнения нижней противоперебойной линии при сезонном регулировании не строится по следующим причинам. При неглубоком сезонном регулировании ввиду малых размеров водохранилища его наполнение в половодье не вызывает затруднений.

При глубоком же сезонном регулировании замедление наполнения водохранилища по сравнению с заполнением, лимитируемым верхней противоперебойной линией, будет означать, что в дальнейшем невозможно поддерживать гарантированную отдачу и необходимо перейти к урезанной отдаче, регламентируемой соответствующей зоной диспетчерского графика (рис. 3.7 а, зона 4).

Ветвь наполнения нижней противоперебойной линии при многолетнем регулировании (рис. 3.7 б и в, линия *cd*) строится для обеспечения заполнения той части емкости водохранилища, которая необходима для поддержания гарантированной отдачи в год, следующий за окончанием критического маловодья.

Очевидно, ветви наполнения верхней и нижней противопере-

бойных линий должны быть ориентированы на сосредоточенное (резкое) половодье расчетных лет, поскольку верхняя ветвь ограничивает зону гарантированной отдачи сверху (зону 1) и, стало быть, предупреждает необоснованный переход на повышенную отдачу (в зону 2) при замедленном ходе наполнения водохранилища, а нижняя ветвь ограничивает зону гарантированной отдачи снизу и, следовательно, предупреждает необоснованный переход к урезанной отдаче (в зону 4).

Назначением ветвей опорожнения верхней и нижней противоперебойных линий при всех масштабах регулирования (рис. 3.7 а, линии *ab* и *db* и рис. 3.7 б и в, линии *ab* и *dh*) является жестко очертить зону гарантированной отдачи (зону 1) при сработке водохранилища и предупредить необоснованный переход как в зону повышенной (2), так и в зону урезанной отдачи (4). Эти ветви опорожнения в целях предотвращения быстрой сработки водохранилища должны строиться по притоку, снижающемуся к концу опорожнения.

Ветвь наполнения противосбросовой линии как при сезонном, так и при многолетнем регулировании (линии *gc*) имеет одинаковый смысл — в задачу ее входит предотвратить чрезмерно быстрое наполнение водохранилища с целью свести к минимуму или полностью устранить холостые сбросы.

Ветвь опорожнения противосбросовой линии (линии *fb*) обеспечивает предполоводную сработку при сезонном регулировании всей полезной емкости водохранилища и при многолетнем — сезонной составляющей и тем самым предотвращает непредусмотренные сбросы при наполнении водохранилища в следующем водохозяйственном году.

Таким образом, зона гарантированной отдачи (зона 1) при сезонном регулировании зажата в относительно узкие пределы. При многолетнем же регулировании границы этой зоны значительно расширяются и чем выше степень регулирования, тем шире зона.

В зоне 2 величина отдачи удерживается в интервале от гарантированной  $Q_p$  до максимальной  $Q_B$ . В целях более строгого регламентирования повышенной отдачи и постепенного ее увеличения эта зона в свою очередь делится на подзоны с определенными ступенями отдачи или для нее составляется специальный диспетчерский график в координатах расходов и наполнения водохранилища (рис. 3.7, г и § 6).

В зоне 3, располагающейся выше противосбросовой линии, водохранилище работает с отдачей  $Q_B$ .

В зоне 4, ограниченной сверху нижней противоперебойной линией и представляющей собой зону с неполным удовлетворением потребностей в воде, вследствие наступления перебойного периода за пределами расчетной обеспеченности отдача понижается. В этой зоне выделяется ряд ступеней для смягчения пе-

рехода от гарантированной к постепенно снижающейся урезанной отдаче.

Схема диспетчерского графика при многолетнем регулировании на удовлетворение нескольких потребителей с различным процентом обеспеченности гарантированной отдачей в общем сходна со схемой при одном значении гарантированной отдачи. Ее различие с последней заключается в том, что зона гарантированной отдачи (зона 1), очерчиваемая противоперебойными линиями (верхней и нижней), делится на подзоны 1 а, 1 б и т. д. (рис. 3.7 в) по числу ступеней гарантированной отдачи. Зоны же повышенной отдачи (2 и 3), как и зона урезанной отдачи (4), имеют одинаковое значение с соответствующими зонами на диспетчерском графике при одной ступени гарантированной отдачи.

Схема диспетчерского графика, построение которого связывается с реализацией избытков, изображена на рис. 3.7 г.

В рассмотренных схемах диспетчерских графиков мы приняли, что полезная емкость водохранилища целиком предназначена для повышения минимального стока реки и увеличения степени его использования, вследствие чего холостые сбросы допускались лишь при доверху наполненном водохранилище.

Однако в некоторых случаях сезонного регулирования, при соответствующих соотношениях между емкостью и стоком, и во всех случаях многолетнего регулирования одновременно решается и другая проблема водного хозяйства — трансформация высокого стока с целью снижения пропускаемых в нижний бьеф максимальных расходов воды (см. гл. 10). При этом на реках с половодьями, поскольку время наступления их в общем поддается предвидению, указанная трансформация осуществляется той же емкостью водохранилища, которой отводится роль внутригодового регулятора стока, — полной емкостью при сезонном регулировании и сезонной составляющей при многолетнем. В тех же случаях, когда допускается форсировка уровня верхнего бьефа при пропуске катастрофического половодья, в трансформации принимает также участие и призма форсировки. Тогда холостые сбросы могут начинаться с различных уровней водохранилища — от опорожненного (при многолетнем регулировании — только в части сезонной составляющей) до наполненного (последнее совпадает с принятыми положениями в рассмотренных выше схемах диспетчерских графиков).

В указанных случаях участия водохранилища в срезке половодий и паводков диспетчерские графики, содержащие правила полезного расходования воды, дополняются линиями, регламентирующими ход наполнения водохранилища и работу отверстий для холостого сброса расходов. Такими линиями являются противо а в а р и й н ы е [2] для различного числа полностью открытых сбросных отверстий.



Ниже излагаются основные положения методики построения диспетчерских графиков применительно к различной глубине осуществляемого регулирования стока.

При построении диспетчерских графиков считаются заданными следующие исходные данные и положения:

1) основные характеристики плана водохозяйственного использования (размер гарантированной отдачи  $Q_p$ , распределение ее на протяжении года и ее обеспеченность  $p$ ; суммарная производительность водопотребляющих установок  $Q_{\Sigma}$ ; масштабы осуществляемого регулирования — сезонное или многолетнее, глубина этого регулирования и др.);

2) гидрологическая характеристика водотока в створе регулирующего сооружения за весь период наблюдений;

3) данные об ожидаемых изменениях в гидрологическом режиме водотока в связи с деятельностью человека, преобразующей сток;

4) характеристика ожидаемых прогнозов стока — заблаговременность, точность;

5) размеры полезной емкости водохранилища с выделением (при многолетнем регулировании) сезонной и многолетней составляющих, отметки НПП и МО водохранилища.

При разработке диспетчерских графиков так же, как и при расчете сезонной емкости, необходимо год делить на фазы, в пределах которых происходит сработка или наполнение сезонной емкости водохранилища.

В общем случае сработка водохранилища начинается с момента появления на спаде гидрографа половодья расхода, равного регулируемому, и оканчивается в момент появления на подъеме половодья, следующего за меженью, расхода, также равного регулируемому. В соответствующих точках уравнивания расходов притока на подъеме и спаде половодья с регулируемыми расходами начинается и оканчивается наполнение водохранилища.

Длительность сработки и наполнения водохранилища, а отсюда и длительность соответствующих фаз зависит от масштабов осуществляемого регулирования. Чем выше степень регулирования, тем длительнее эти фазы. Очевидно, при многолетнем и глубоком сезонном регулировании сработкой сезонной емкости водохранилища в расчетном году  $T_m$  охватывается вся межень, а в остальную часть года  $T_n$  происходит заполнение сезонной емкости. В таком случае год делится на фазы, общая длительность которых равна году  $T_m + T_n = T_r$  (рис. 4.7 а).

При неглубоком сезонном регулировании длительность периода сработки сокращается, а вместе с тем сокращается и длительность периода наполнения вследствие меньших размеров водохранилища. По-видимому, при таких масштабах сезонного регулирования для периода наполнения водохранилища целесо-

образно назначать используемый расход  $Q$ , исходя из условия  $Q_{в} > Q > Q_{р}$  и в пределе принимая его равным расходу максимальной производительности  $Q = Q_{в}$ .

Величина используемого расхода  $Q$  определится соотношением притока  $\Pi$  и используемого стока  $A_{п}$  за период наполнения водохранилища в расчетном маловодном году. Этот расход  $Q$

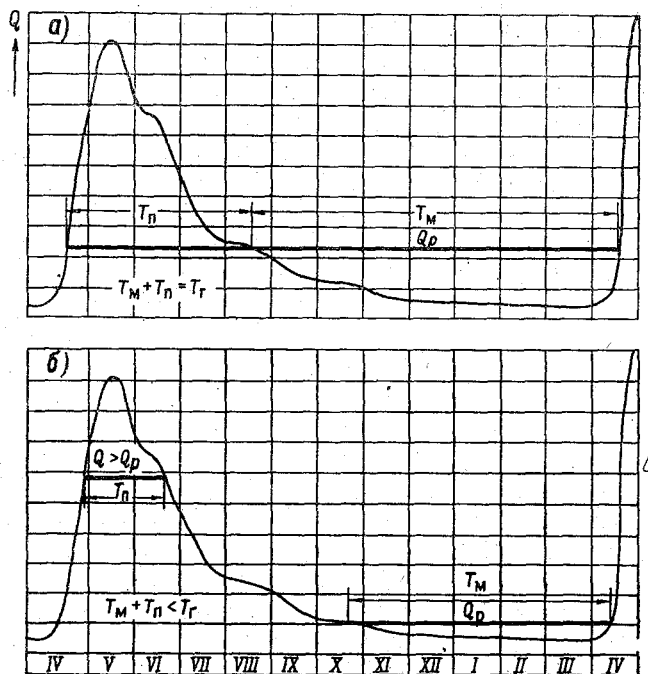


Рис. 4.7. Схема разбивки (по гидрографам) года на фазы при многолетнем и глубоком сезонном регулировании (а), при неглубоком сезонном регулировании (б).

в применении к неглубокому сезонному регулированию можно рассматривать как величину, идентичную  $Q_p$  для периода сработки водохранилища.

Соответственно изложенному, в случае неглубокого регулирования суммарная длительность фаз сработки и наполнения водохранилища оказывается меньше года, и чем ниже степень регулирования, тем фазы короче, т. е.  $T_н + T_м < T_г$  (рис. 4.7 б).

Проведенным выше делением года на фазы определяются расчетные элементы для построения противоперебойной линии ветвей сработки и наполнения водохранилища. Дополнительно под-

лежат выделению фаз сработки и наполнения для построения противосбросовой линии.

Выделение фаз осуществляется в жестких календарных границах, ориентируясь на средние даты. При этом в зависимости от степени подробности расчета и исходных гидрологических данных границы фаз назначаются с точностью до пятидневки, декады или месяца. Чаще всего границы фаз совмещаются с началом месяцев. При выделении фаз необходимо стремиться к тому, чтобы волны половодий (или паводков) всех лет были включены в фазу наполнения водохранилища.

В дальнейшем подлежат учету и крайние границы фаз путем рассмотрения хода стока по декадным, пятидневым или ежедневным расходам за характерные годы.

Жестко закрепив календарные границы фаз, необходимо произвести статистическую обработку стоковых данных по фазам за имеющийся период наблюдений и определить соответствующие параметры: средние величины фазового стока  $\bar{P}$  и  $\bar{M}$  и коэффициенты изменчивости  $C_p$  и асимметрии  $C_s$ .

Расчет и построение элементов диспетчерских графиков начинается с ветви сработки верхней противоперебойной линии, поскольку при таком порядке расчета, помимо основной задачи — построения противоперебойной линии, решается и другой вопрос — уточняются размеры сезонной емкости водохранилища, предварительно установленные по формулам. Затем рассчитываются остальные элементы, относящиеся как к ветви сработки, так и к ветви наполнения.

Элементы диспетчерских графиков получаются построением огибающих соответствующих линий сработки и наполнения водохранилища, относящихся к ряду реальных характерных лет. Сток этих лет предварительно приводится к расчетным величинам. При таком построении элементов диспетчерских графиков учитывается наиболее невыгодное распределение стока внутри года или сезона, благодаря чему переход к повышенной или урезанной отдаче может быть осуществлен лишь при наличии соответственно больших или малых запасов воды в водохранилище. (При проведении указанных огибающих резко отклоняющиеся от преобладающего направления отдельные линии не должны приниматься во внимание.)

Рассчитанные и построенные указанным путем отдельные элементы сводятся в единый диспетчерский график, на основе которого осуществляются расчеты регулирования и эксплуатация водохранилища.

В случае энергетического использования водотока и если водохранилище является верхним бьефом ГЭС, при построении диспетчерских графиков учитываются топографические особенности водохранилища и гидравлические характеристики нижнего бьефа ГЭС, определяющие действующий напор на установке.

#### § 4. ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ ПРИ СЕЗОННОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Конкретные формы диспетчерских графиков при сезонном регулировании и положение на них основных элементов — противоперебойных и противосбросовой линий — определяются:

- а) глубиной сезонного регулирования;
- б) характером внутригодового распределения стока и соотношением стока за отдельные фазы;
- в) соотношением между величинами расходов гарантированного  $Q_p$  и максимального  $Q_B$ ;
- г) топографическими характеристиками водохранилища (при энергетическом использовании).

Необходимо различать два основных вида сезонного регулирования:

1) глубокое, когда годовая гарантированная отдача  $A_r$  по величине приближается к стоку расчетного маловодного года  $\Gamma_p$  или равна ему и

2) неглубокое, когда годовая гарантированная отдача  $A_r$  по величине существенно меньше стока расчетного маловодного года  $\Gamma_p$ . Здесь под «расчетным маловодным» понимается год, суммарный сток которого  $\Gamma_p$  отвечает принятой обеспеченности  $p$ .

Расчетные величины стока за фазы, используемые в дальнейшем при построении противоперебойных линий, рекомендуется определять следующим путем.

**При глубоком регулировании ( $A_r \cong \Gamma_p$ ).** Объем стока за фазу сработки  $M_p$  устанавливается по кривой обеспеченности межennaleго стока соответственно принятой обеспеченности  $p$ . Объем стока за фазу наполнения  $\Pi$  находится:

а) при отдаче  $A_r > M_p + \Pi_p$  — по разности  $\Gamma_p - M_p$ ;

б) при отдаче  $A_r \leq M_p + \Pi_p$  — по кривой обеспеченности годового стока при обеспеченности  $p$ .

**При неглубоком регулировании ( $A_r < \Gamma_p$ ).** Объемы стока за фазы сработки  $M_p$  и наполнения  $\Pi_p$  устанавливаются по соответствующим кривым обеспеченности межennaleго и годового стока при принятой обеспеченности  $p$ .

Расчетные величины стока для построения противосбросовой линии независимо от масштабов сезонного регулирования также устанавливаются по соответствующим кривым обеспеченности фазового стока. При этом водность такого стока принимается по обеспеченности  $p' = 1 - p$ .

Рассмотрим конкретные приемы построения элементов диспетчерских графиков при сезонном регулировании.

#### Противоперебойные линии — ветвь сработки

Для построения ветви сработки противоперебойных линий отбираются реальные годы, сток которых за межennaleго близок к расчетной величине  $M_p$ . Таких лет даже в составе сравнительно дли-

тельного 50—60-летнего периода обычно бывает очень мало, поэтому для анализа приходится брать и другие годы, сток которых несколько отличается от величины  $M_p$ . Для более или менее полной обрисовки противоперебойных линий достаточно отобрать всего 5—8 лет.

За устойчивую часть межени расходы выбранных лет, как правило, принимаются по средним месячным значениям, а за переходные периоды — от спада половодья к межени и от межени к подъему половодья — по средним декадным, средним пятидневным или средними суточным. Умножением на отношение стока  $M_p$  к стоку межени данного года  $M_i$  расходы выбранных лет приводятся к расчетной величине, на основе которых по заданному расходу  $Q_p$  определяются ординаты ветви сработки.

Расчет ветви сработки ведется ходом назад, т. е. против течения времени, начиная с опорожненного водохранилища (см. табл. 1.7). За начало построения в каждом году принимается своя дата. Вследствие разновременности прохождения волны половодья эти линии начинаются в различных точках на шкале времени. В зависимости от режима водотока интервал времени, в пределах которого оканчивается сработка водохранилища в разные годы, составляет 15—20 дней, и в некоторых случаях достигает одного месяца.

Верхняя огибающая всех построенных линий принимается за ветвь сработки верхней противоперебойной линии (рис. 5.7, *а* линия 1).

Ветвь сработки верхней противоперебойной линии охватывает всю полезную призму водохранилища сезонного регулирования, а по времени — всю межень, учитывая раннее начало и позднее окончание ее. По ней и уточняются размеры полезной емкости, вычисленные по стоку межени  $M_p$  в жестких календарных границах.

Нижняя огибающая построенных линий, ориентированная на наиболее позднее окончание межени (рис. 5.7 *а* линия 2) принимается за ветвь сработки нижней противоперебойной линии.

### Противоперебойная линия — ветвь наполнения

При расчете и построении ветви наполнения верхней противоперебойной линии, как установлено выше, имеются два основных случая:

1) когда водохранилище в расчетный маловодный год наполняется при использовании расхода  $Q = Q_p$  — глубокое сезонное регулирование и

2) когда водохранилище в расчетный маловодный год наполняется при использовании расхода  $Q > Q_p$  — неглубокое сезонное регулирование.

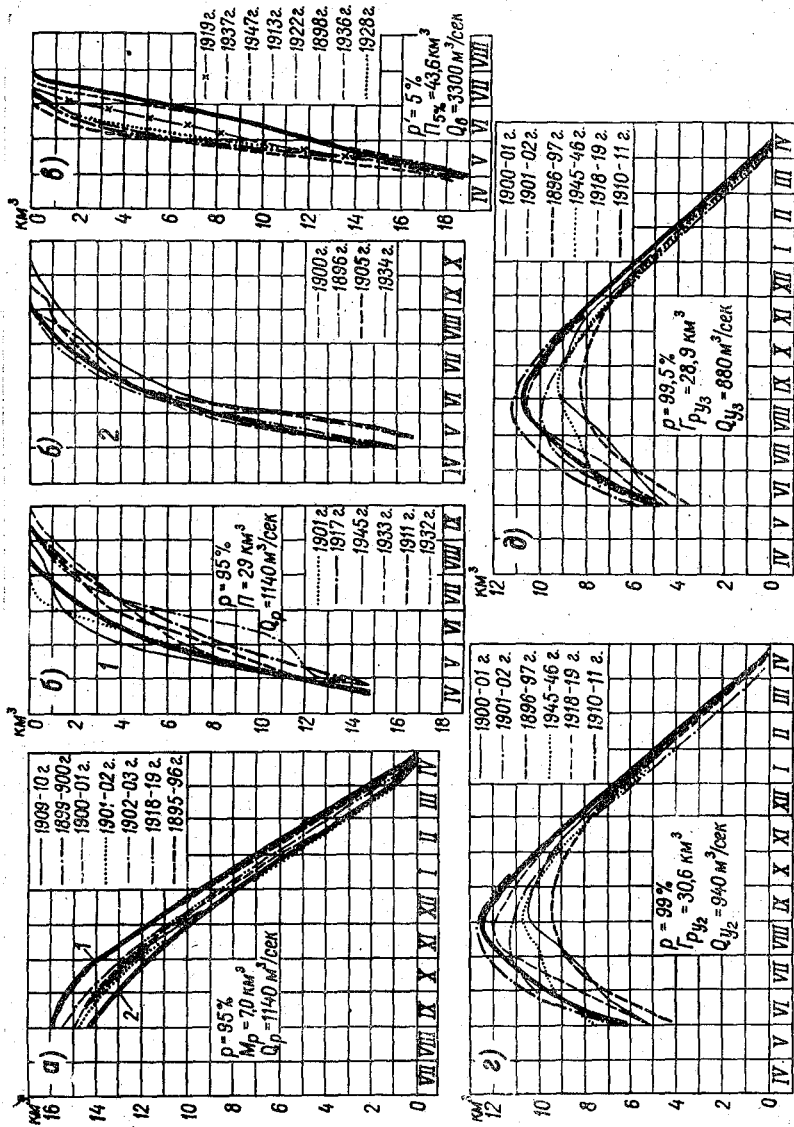


Рис. 5.7. Построение элементов диспетчерского графика при глубоком сезонном регулировании.  
 а — ветви сработки противоперебойной линии — верхней (1) и нижней (2); б — ветви наполнения верхней противоперебойной линии при раннем (1) и позднем (2) повороте; в — ветви наполнения противоблоковой линии; г — верхняя граница второй ступени урезанной отдачи; д — верхняя граница третьей ступени урезанной отдачи.

Для построения ветви наполнения верхней противоперебойной линии при глубоком сезонном регулировании из числа лет гидрологического ряда отбираются годы, отвечающие следующим двум требованиям:

а) сток за фазу наполнения близок к расчетной величине  $\Pi = \Gamma_p - M_p$ ;

б) половодье начинается либо в ранние, либо в поздние сроки.

Аналогично предыдущему сток отобранных лет приводится к расчетному значению путем перемножения его на отношение объема расчетного стока  $\Pi$  к стоку данного года  $\Pi_i$ . Затем эти годы распределяются на группы по признаку времени наступления половодья: раннее и позднее, и по каждой из групп ходом назад рассчитываются (см. табл. 2.7) и строятся линии возможного накопления стока в водохранилище при отдаче  $Q_p$ . За начало построения принимаются даты окончания наполнения водохранилища, определяющиеся моментом наступления на спаде половодий расхода, равного регулируемому. Шкала объемов накопления стока направляется вниз.

По нескольким линиям накопления стока, относящимся к ранним и поздним половодьям, проводятся верхние огибающие (рис. 5.7 б).

Сравнением наибольших ординат огибающих с полезной емкостью устанавливается степень возможного наполнения водохранилища при раннем или позднем половодье. Этими наполнениями и определяется глубина обязательной предполоводной сработки водохранилища, если более глубокая сработка не вызывается необходимостью поддержания гарантированной отдачи. При этом следует обратить внимание на то обстоятельство, что в большинстве случаев высота волны раннего половодья обычно меньше, чем позднего. Следовательно, как правило, поздним половодьем обеспечивается большее наполнение водохранилища, что является благоприятным моментом, поскольку началу его будет предшествовать и более глубокая сработка полезной емкости.

Переход от огибающих линий накопления стока к ветви наполнения противоперебойных линий диспетчерского графика осуществляется путем пересчета их ординат по отношению к нормальной шкале объемов (наполнений) водохранилища (по разности: емкость минус ординаты огибающих — см. табл. 3.7).

По вычисленным ординатам на диспетчерский график наносятся ветви наполнения противоперебойных линий, которыми, как отмечалось, очерчивается верхняя граница зоны гарантированной отдачи при раннем или позднем половодье.

При промежуточных сроках начала половодья положение противоперебойной линии может быть определено по интерполяции. В таком случае ветвь наполнения противоперебойной линии приобретает смысл «скользящей», так как ее местоположение на шкале времени зависит от даты начала половодья.

Только что рассмотренные основные положения, определяющие правила построения ветви наполнения противоперебойной линии при глубоком сезонном регулировании, в общем сохраняют силу и для случаев неглубокого сезонного регулирования. Специфика заключается в том, что при неглубоком сезонном регулировании, как указывалось выше, в период наполнения водохранилища регулируемые расходы повышаются по сравнению с обеспечиваемыми величинами при сработке его.

Отбор расчетных лет из состава гидрологического ряда производится с учетом ранее изложенных требований с той лишь разницей, что отобранные для анализа годы должны обладать половодным стоком, близким к величине  $\Pi_p$ . Указанная величина  $\Pi_p$  отвечает той длительности половодного периода, за который при заданном используемом расходе  $Q$ , равном  $Q_v > Q > Q_p$  или  $Q = Q_p$ , обеспечивается в расчетном маловодном году заполнение полезной призмы водохранилища.

В дальнейшем, после привошки стока отобранных лет к расчетной величине  $\Pi_p$  и рассортировки их на группы с ранними и поздними половодьями, указанным ранее способом строятся линии накопления стока и далее — огибающие, которые после соответствующего пересчета ординат наносятся на диспетчерский график в качестве ветви наполнения верхней противоперебойной линии.

### Противосбросовая линия

Ветвью сработки противосбросовой линии обычно охватывается конец межени длительностью порядка 1—3 месяца и строится она по притоку межени многоводного года с обеспеченностью  $p'$  и по расходу максимальной производительности установки  $Q_v$ .

Вследствие того что на протяжении рассматриваемой части межени приток, как правило, устойчив, в расчет можно вводить среднюю величину расхода притока  $Q_p^{(пр)}$  заданной обеспеченности. Тогда ветвь сработки будет представлена прямой с началом при наполненном водохранилище и концом — при опорожненном на величину диспетчерской емкости предполоводной сработки  $V_d^c$ , равной разности между полезной емкостью  $V$  и диспетчерской емкостью предполоводного наполнения  $V_d^н$ , рассматриваемого верхней противоперебойной линией. При этом, если объем возможного накопления стока в расчетное половодье окажется меньше указанной разности, диспетчерская емкость предполоводной сработки принимается равной этому объему. Чтобы выполнить основную задачу — предотвратить сбросы, нижний конец противосбросовой линии должен быть ориентирован на раннее начало половодья.



Так как координаты конца противосбросовой линии задаются условиями обеспечения наполнения водохранилища расчетным половодьем, или противоперебойной линией, по существу, единственной неизвестной становится абсцисса начала этой линии (время начала сработки), а отсюда и длительность сработки водохранилища. Последнюю можно определить подбором, исходя из заданных величин диспетчерской емкости сработки  $V_d^c$  и расходов  $Q_B$  и  $Q_{p'}^{(пр)}$ , пользуясь выражением

$$T = \frac{V_d^c + Q_{p'}^{(пр)} T}{Q_B} \quad (1.7)$$

Вычтя из абсциссы конца противосбросовой линии величину найденной длительности опорожнения водохранилища  $T$ , получим абсциссу начала ее.

Таким образом, расчеты по построению противосбросовой линии ветви сработки водохранилища, представляемой в виде прямой, сводятся к отысканию абсциссы начала ее, а остальные элементы — ордината начала и координаты конца линии — заданы условиями задачи.

Ветвь наполнения противосбросовой линии рассчитывается и строится теми же способами, какие применены в отношении построения ветви наполнения противоперебойной линии. Из периода гидрологических наблюдений отбираются годы с величинами стока за половодную фазу, выделенную, как указано выше, близкими к  $P_{p'}$ , т. е. к объему с обеспеченностью  $p=100-p$ . После приведения стока расчетных лет к  $P_{p'}$  строятся линии накопления стока ходом назад от наполненного водохранилища. Нижняя огибающая этих линий и принимается в качестве ветви наполнения противосбросовой линии (рис. 5.7 в).

При построении ветви наполнения противосбросовой линии могут встретиться два случая:

По одному из них наибольшая ордината ее превышает соответствующую диспетчерскую емкость предполоводной сработки водохранилища, что является свидетельством невозможности предотвратить холостые сбросы. Такое положение свойственно по преимуществу установкам с неглубоким регулированием, т. е. при малой емкости водохранилища. Такое же положение может наблюдаться и на установках с глубоким регулированием, но с небольшой максимальной производительностью  $Q_B$  и сосредоточенными половодьями.

В другом случае наибольшая ордината противосбросовой линии не достигает величины диспетчерской емкости предполоводной сработки, что указывает на возможность полного предотвращения сбросов путем своевременного перехода на повышенную отдачу вплоть до максимальной производительности водопотреб-

ляющих установок  $Q_B$ . Указанное положение характерно при невысоких и растянутых половодьях, больших размерах водохранилища и большой производительности  $Q_B$ .

При переходе от ординат огибающей линии накопления стока (рис. 5.7 *в*) к ординатам противобросовой линии в первом из указанных случаев максимальная ордината огибающей совмещается с начальными ординатами ветви наполнения верхней противоперебойной линии. Во втором случае начальной ординатой противобросовой линии будет разность между емкостью водохранилища  $V$  и максимальной ординатой огибающей.

В связи с разновременностью прохождения волны половодья для ветви наполнения противобросовой линии, подобно противоперебойной линии, также применяется скользящая шкала времени.

### Зона повышенной отдачи (избытков)

Зона повышенной отдачи (избытков) располагается между ветвями сработки и наполнения верхней противоперебойной и соответствующими ветвями противобросовой линии. Ее размеры тем значительнее, чем меньше глубина регулирования и чем больше максимальная производительность водопотребляющих установок  $Q_B$ . При глубоком регулировании, а следовательно, высоком значении гарантированного расхода  $Q_p$  и относительно малой производительности  $Q_B$  эта зона сокращается, следствием чего является упрощение плана реализации повышенной отдачи. В таких случаях планом должен предусматриваться переход непосредственно от отдачи  $Q_p$  к отдаче  $Q_B$  при наполнениях водохранилища, превышающих ординаты противоперебойной линии.

При других соотношениях между  $Q_p$  и  $Q_B$ , т. е. при малом  $Q_p$  и высоком  $Q_B$ , зона избытков расширяется; возникает необходимость выделения подзон.

Для этого зона избытков рядом линий делится на подзоны (рис. 6.7), в пределах которых отдача поддерживается на определенной величине, равной  $Q_p + \Delta Q$ . Число промежуточных подзон определяется амплитудой расходов  $Q_p$  и  $Q_B$ .

Поскольку верхней границей рассматриваемой зоны является противобросовая линия, рассчитываемая по многоводному стоку с обеспеченностью  $p'$ , а нижней — противоперебойная линия, рассчитываемая по стоку межени с обеспеченностью  $p$ , расчет отдачи в диапазоне от  $Q_p$  до  $Q_B$  необходимо производить по среднему стоку межени.

Расчет линий, разграничивающих зону избытков на подзоны, ведется по той же схеме, как указано для противобросовой линии. При этом координаты начала и конца линий задаются используемые ресурсы определяются по сумме стока и диспетчерской емкости сработки (той же, что и при расчете противобросо-

совой линии), а регулируемые расходы  $Q = Q_p + \Delta Q$  определяются по выражению

$$Q = \frac{V_{\text{д}}^{\text{с}} + Q_{\text{ср}}^{(\text{пр})} T}{T}, \quad (2.7)$$

где  $T$  — период опорожнения диспетчерской емкости  $V_{\text{д}}^{\text{с}}$ ;  $Q_{\text{ср}}^{(\text{пр})} T$  — сток за период опорожнения емкости.

Конец всех линий совпадает с концом противобросовой линии (см. выше), а начало — по времени задается на границах месяца.

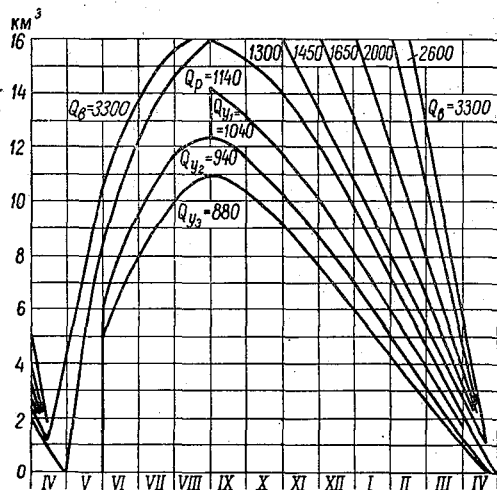


Рис. 6.7. Диспетчерский график при глубоком сезонном регулировании.

цев или полумесяцев (декад), а по емкости — при наполненном доверху водохранилище. Линии проводятся по прямой. Так как найденными расходами  $Q$  регламентируется отдача в подзонах, разграниченных данными линиями и выше лежащими, то величина расхода в подзоне, смежной с зоной гарантированной отдачи, находится по интерполяции между расходами в пограничной с ней зоне  $Q_p$  и следующей за ней подзоне.

Для периода наполнения водохранилища в случае большой амплитуды расходов  $Q_p$  и  $Q_{\text{в}}$  необходимо в зоне избытков также разрабатывать дифференцированные правила, предусматривающие постепенное повышение отдачи в соответствии с водностью половодья.

## Зона урезанной отдачи (ограничений)

Графики, регламентирующие режим ограничений при глубоком сезонном регулировании, как вытекает из предшествующего, своей верхней границей имеют нижнюю противоположную линию, отделяющую выше расположенную зону гарантированной отдачи от зоны урезанной отдачи. Нижней границей зоны ограничений является опорожнение водохранилища до горизонта мертвого объема.

В пределах зоны ограничений назначается три (или более) ступени урезанной отдачи —  $Q_{y_1}$ ,  $Q_{y_2}$  и  $Q_{y_3}$ , располагающиеся на диспетчерском графике сверху вниз.

Величины урезанной отдачи выделенных ступеней должны определяться по стоку маловодных лет с обеспеченностью более высокой, чем обеспеченность гарантированной отдачи. В практике при оценке величин урезанной отдачи обычно принимаются обеспеченности: для второй ступени 99%, для третьей 99,5%. Величина отдачи первой ступени  $Q_{y_1}$  находится по интерполяции между смежной с ней отдачей гарантированной  $Q_p$  и второй ступени  $Q_{y_2}$ . Указанные обеспеченности урезанной отдачи следует рассматривать как примерные. Они отвечают случаям, когда гарантированная отдача регулируется с очень высокой обеспеченностью, порядка 95—97%. В других же случаях целесообразными могут оказаться иные значения рассматриваемых обеспеченностей.

В соответствии с принятыми условиями расчет верхней границы второй ступени урезанной отдачи ведется на обеспеченность 99%. Эта граница получается как верхняя огибающая линий хода наполнения — срабатывания водохранилища (расчет аналогичен показанному в табл. 1.7 и 2.7), построенных по нескольким реальным годам, сток которых приведен к расчетной величине  $\Gamma_{py_2} = 99\%$  (рис. 5.7 з), и при отдаче  $Q_{y_2}$ , найденной по тому же годовому стоку (см. ниже). При определении урезанной отдачи следует учесть, что ограничения вводятся не с самого начала года, а лишь спустя некоторое время, когда появится угроза недополнения водохранилища к концу половодья. За момент начала ввода ограничений принимается дата через 1—3 месяца от начала половодья (при растянутых половодьях дата начала ограничений отодвигается).

Величина расхода урезанной отдачи может быть найдена по выражению

$$Q_y = \frac{\Gamma_{py} - Q_p t}{T_r - t}, \quad (3.7)$$

где  $\Gamma_{py}$  — годовой сток принятой обеспеченности;  $t$  — период от

начала наполнения водохранилища до ввода ограничения;  $T_r$  — годовой период.

По стоку нескольких реальных лет, приведенному к расчетной величине  $\Gamma_{p_y} = 99,5\%$ , аналогичным способом находится верхняя граница и величина [по выражению (3.7)] третьей ступени урезанной отдачи  $Q_{y_3}$  (рис. 5.7 д).

Проведенными расчетами и построениями определены величины и границы выделенных ступеней урезанной отдачи. При большой разнице в величинах отдачи между смежными ступенями для сглаживания перехода к меньшему значению урезанной отдачи необходимо внутри ступеней выделять более мелкие градации.

При неглубоком регулировании правила, регламентирующие режим ограничений, включают в себя одну линию, отделяющую зону гарантированной отдачи от зоны урезанной отдачи. Функцию этой линии выполняет верхняя огибающая линий сработки, рассчитанных по урезанной отдаче и по стоку за межень расчетной обеспеченности 99%. При этом ограничения вводятся не с начала межени, а лишь по истечении некоторого периода, когда появится опасность преждевременного опорожнения водохранилища.

Величина расхода урезанной отдачи в соответствии с этим находится исходя из стока межени с обеспеченностью 99%, запав воды в водохранилище к началу межени, принимаемых равными емкости  $V$ , и объема гарантированной отдачи, обеспечиваемой до начала ввода ограничений. Если длительность сработки водохранилища с учетом раннего начала и позднего окончания межени обозначить через  $T_m$ , а длительность периода от начала сработки до ввода ограничений — через  $t$ , то расход  $Q_{y_m}$  урезанной отдачи определится по выражению

$$Q_{y_m} = \frac{M_{p_y} + V - Q_p t}{T_m - t} \quad (4.7)$$

Здесь  $M_{p_y}$  — объем меженного стока с заданной обеспеченностью  $p_y$ , отнесенный ко всему периоду сработки водохранилища  $T_m$ .

Величина регулируемого расхода при наполнении водохранилища в условиях наступившего маловодья также уменьшается по сравнению с расходом, регулируемым в расчетном маловодном году. Значение этого расхода  $Q_{y_n}$  определяется по стоку половодья  $\Pi_{p_y}$  с той же обеспеченностью  $p_y$ , пользуясь выражением

$$Q_{y_n} = \frac{\Pi_{p_y} - V}{T_n} \quad (5.7)$$

где  $T_n$  — длительность половодья.

## Пример расчета и построения диспетчерского графика

Ниже рассматривается пример расчета и построения диспетчерского графика при глубоком сезонном регулировании. Водохранилище создается на водотоке, естественный режим которого характеризуется следующими особенностями.

Расходы от минимальных в конце марта — начале апреля увеличиваются до максимальных во второй половине апреля — первой половине мая. Нарастание волны половодья происходит весьма интенсивно и длится недолго — не более одного месяца. Спад половодья растянутый и нередко продолжается до августа — сентября. Сток в летне-осенний период неустойчив. Зимняя межень устойчива и характеризуется постепенным снижением стока к концу зимы.

Период высокого стока в году в среднем длится 5 месяцев — с апреля по август и низкого 7 месяцев — с сентября по март. Доля стока за эти периоды в общегодовом составляет: с апреля по август — 77,1%, с сентября по март — 22,9%.

Почти 60% годового стока проходит за 3 весенне-летних месяца (с мая по июль), а за 5 зимних (с ноября по март) — около 10%.

По характеру внутригодового распределения стока водоток, по классификации Б. Д. Зайкова, относится к группе рек с весенним половодьем (тип алтайский). Этот тип внутригодового распределения стока имеет большое распространение по территории СССР. Поэтому разработанный пример представляет значительный интерес.

Гидрологические данные представлены 56-летним рядом наблюдений. Величины стока по многолетним данным равны:

Средний годовой расход . . . . .	$\bar{Q} = 1640 \text{ м}^3/\text{сек}$
Средний годовой сток . . . . .	$\bar{G} = 51,6 \text{ км}^3$
Коэффициент изменчивости годового стока . . . . .	$C_{v, \Gamma} = 0,20$
Средний сток межени (IX—III) . . . . .	$\bar{M} = 11,8 \text{ км}^3$
Коэффициент изменчивости стока межени . . . . .	$C_{v, \text{м}} = 0,28$
Средний сток половодья (IV—VIII) . . . . .	$\bar{P} = 39,8 \text{ км}^3$
Коэффициент изменчивости стока половодья . . . . .	$C_{v, \text{п}} = 0,20$
Средний сток зимней межени (XI—III) . . . . .	$\bar{M}_1 = 5,4 \text{ км}^3$
Коэффициент изменчивости стока зимней межени . . . . .	$C_{v, \text{м}_1} = 0,25$
Средний сток части половодья (V—VII) . . . . .	$\bar{P}_1 = 30,6 \text{ км}^3$
Коэффициент изменчивости стока части половодья . . . . .	$C_{v, \text{п}_1} = 0,24$

Расчетная обеспеченность  $p$  гарантированной отдачи принимается равной 95% по вероятности бесперебойных лет. Годовая отдача  $A_{\Gamma}$  приравнивается годовому стоку заданной обеспечен-

ности —  $\Gamma_p = 36,0 \text{ км}^3$ . Потребление воды по гарантированному режиму задается равномерным на протяжении года с величиной расхода

$$Q_p = \frac{A_r}{31,5 \cdot 10^6} = \frac{36,0 \cdot 10^9}{31,5 \cdot 10^6} = 1140 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

При среднем годовом расходе  $1640 \text{ м}^3/\text{сек}$  коэффициент регулирования  $\alpha = 0,70$ . Максимальная производительность водопотребляющих установок  $Q_b = 3300 \text{ м}^3/\text{сек}$ , что превышает гарантированный расход в 2,9 раза. Потери из водохранилища включены в отдачу.

В соответствии с ходом стока реки и принятым режимом гарантированной отдачи год разделен на две фазы в жестких календарных границах:

половодный период . . . . . с 1/IV по 31/VIII — 5 месяцев  
меженный период . . . . . с 1/IX по 31/III — 7 "

По стоку этих фаз ведется расчет противоперебойной линии и уточняются размеры полезной емкости водохранилища.

Кроме того, выделены фазы для расчета и построения противосбросовой линии:

часть половодья . . . . . с 1/V по 31/VII — 3 месяца  
часть межени . . . . . с 1/II по 31/III — 2 "

**Приближенный расчет полезной емкости водохранилища.** По стоку межени расчетной обеспеченности в жестких календарных границах (сентябрь—март)  $M_p = 7,0 \text{ км}^3$  и объема отдачи за фазу межени  $A_m = 1140 \cdot 7 \cdot 2,63 \cdot 10^6 = 21,0 \text{ км}^3$  определяются приближенные размеры полезной емкости

$$V = A_m - M_p = 21,0 - 7,0 = 14,0 \text{ км}^3.$$

**Противоперебойные линии — ветвь сработки.** Для расчета ветви сработки противоперебойных линий отобрано 7 лет со стоком межени (сентябрь—март), близким к  $M_p = 7,0 \text{ км}^3$ . Сток этих лет приведен к расчетному. В табл. 1.7 дан пример подобной приводки стока и расчета сработки емкости водохранилища за 1909/10 г. (коэффициент приводки  $\frac{7,0}{6,4} = 1,09$ ).

Рассчитанные по отобранным годам дефициты стока (сработки емкости), а по ним необходимые для поддержания гарантированной отдачи до конца межени запасы воды в водохранилище нанесены на рис. 5.7 а. Как видно из рисунка, каждому году отвечает своя линия сработки водохранилища. Верхняя огибающая (1) построенных линий принимается за ветвь сработки верхней противоперебойной линии, а нижняя огибающая (2) — за ветвь сработки нижней противоперебойной линии.

Таблица 1.7

Год	Месяц	Пятидневка	Расходы, м <sup>3</sup> /сек			Объемы, км <sup>3</sup>	
			по наблюдени- ям	приве- денные	дефицит до гарантируе- мого расхода 1140 м <sup>3</sup> /сек	дефицита (сработки) за месяц (пятиднев- ку)	запасов во- ды, требую- щихся на конец ме- сяца (пяти- дневки)
1909	IX	—	640	698	442	1,16	15,04
	X	—	493	537	603	1,58	13,88
	XI	—	266	290	850	2,23	12,30
	XII	—	351	382	758	1,99	10,07
1910	I	—	237	258	882	2,32	8,08
	II	—	228	248	892	2,34	5,76
	III	—	209	228	912	2,40	3,42
	IV	1	218	233	907	0,39	1,02
		2	234	262	878	0,38	0,63
3	515	561	579	0,25	0,25	0	

Наибольшая ордината ветви сработки верхней противоперебойной линии составила 16,0 км<sup>3</sup>, которой и определяется уточненная величина емкости водохранилища V. Таким образом, на основе учета раннего начала и позднего окончания межени размеры полезной емкости уточнились на 16,0—14,0=2,0 км<sup>3</sup> по сравнению с величиной, найденной по стоку межени в жестких календарных границах.

Максимальная длительность периода сработки водохранилища составила 8 месяцев — с 1/IX по 30/IV, что на один месяц продолжительнее принятой фазы межени в границах сентябрь—март.

**Противоперебойная линия — ветвь наполнения.** Расчетный сток принимается по разности  $\Pi = \Gamma_p - M_p = 36,0 - 7,0 = 29,0$  км<sup>3</sup>.

Для расчета ветви наполнения противоперебойной линии отобрано 10 лет. Все годы разделены на две группы по признаку времени появления на подъеме половодья расходов, равных  $Q_p = 1140$  м<sup>3</sup>/сек, с которых начинается наполнение водохранилища: ранее (примерно с 16/IV), позднее (примерно с 1/V).

По всем годам проведены расчеты ходом назад возможного накопления стока водохранилищем. Результаты расчетов нанесены на рис. 5.7 б. Порядок расчета легко проследить по табл. 2.7, в которой приводится пример, относящийся к половодью 1896 г. (коэффициент приводки  $\frac{29,0}{25,4} = 1,14$ ).

По обеим группам линий проведены верхние огибающие.

Как видно на рис. 5.7 б, наибольшая ордината огибающей при раннем половодье составляет 14,8 км<sup>3</sup> и позднем — 16,0 км<sup>3</sup>,



т. е. в первом случае не обеспечивается заполнение полностью опорожненного водохранилища емкостью 16,0 км<sup>3</sup>. Величиной 14,8 км<sup>3</sup> и определяется размер обязательной сработки водохранилища к началу раннего половодья. Таким образом, если по условиям поддержания гарантированной отдачи более глубокая сработка не нужна, то к началу раннего половодья запасы воды в водохранилище не должны быть меньше 16,0—14,8=1,2 км<sup>3</sup>. Обязательная же сработка водохранилища к началу поздних половодий должна вестись в расчете на полное опорожнение водохранилища.

Таблица 2.7

Месяц	Пятидневка	Расходы, м <sup>3</sup> /сек			Объемы накопления, км <sup>3</sup>	
		по наблюдениям	приведенные	превышение над гарантированным 1140 м <sup>3</sup> /сек	за месяц (пятидневку)	суммарно на конец месяца (пятидневку)
V	1	1920	2190	1050	0,45	15,83
	2	3766	4300	3160	1,37	15,38
	3	3970	4530	3390	1,47	14,01
	4	3944	4500	3360	1,45	12,54
	5	3892	4440	3300	1,43	11,09
	6	3723	4250	3110	1,35	9,66
VI	—	2660	3030	1890	4,98	8,31
VII	—	1750	1995	855	2,25	3,33
VIII	—	1280	1460	320	0,84	1,08
IX	1	1250	1425	285	0,12	0,24
	2	1128	1286	146	0,06	0,12
	3	1120	1277	137	0,06	0,06

Пересчет ординат огибающих линий накопления стока в ординаты противоперебойной линии ветви наполнения выполнен в табл. 3.7 (в км<sup>3</sup>, на конец месяца или пятидневки).

Таблица 3.7

Месяц	Пятидневка	Ординаты огибающих накопления стока при половодье (по рис. 5.7 б)		Ординаты противоперебойной линии при половодье	
		раннем	позднем	раннем	позднем
IV	4	14,8		1,2	
	5	13,9		2,1	
	6	12,8		3,2	
V	—	11,5	16,0	4,5	0
	—	5,5	7,7	10,5	8,3
	—	2,3	3,7	13,7	12,3
VI	—	0,5	1,4	15,5	14,6
	—	0	0,9	16,0	15,1
VII	2		0		16,0
	6		0		16,0

**Противосбросовая линия и зона избытков.** Объем стока за фазу наполнения, выделенную для построения противосбросовой линии при обеспеченности  $p' = 100 - p = 100 - 95 = 5\%$ , равен  $43,6 \text{ км}^3$ . Если допустить работу водохозяйственной установки с полной производительностью  $Q_b = 3300 \text{ м}^3/\text{сек}$  в течение всей фазы (май — июль), будет использован сток в объеме  $26,1 \text{ км}^3$ . В сумме со стоком, аккумулируемым в водохранилище, общий объем составит  $26,1 + 16,0 = 42,1 \text{ км}^3$ , что меньше притока ( $43,6 \text{ км}^3$ ). Таким образом, часть воды неизбежно будет сброшена вхолостую.

Для построения противосбросовой линии отобрано 8 лет.

Расчет возможной аккумуляции стока при используемом расходе  $Q_b = 3300 \text{ м}^3/\text{сек}$  проведен ходом назад (в таблице, подобной 2.7) и результаты нанесены на рис. 5.7 в. Максимальная ордината нижней огибающей составляет  $19,0 \text{ км}^3$ , что превышает полезную емкость водохранилища, и следовательно, как уже отмечалось выше, сбросы неизбежны.

Вследствие такого соотношения между используемым стоком и притоком к водохранилищу противосбросовая линия ветви наполнения почти целиком расположилась ниже противоперебойной и в ее построении для данного случая надобности нет (сравни рис. 5.7 в и б). Здесь необходимо разработать дифференцированные правила постепенного повышения отдачи в период наполнения водохранилища в соответствии с водностью половодного периода. Однако ввиду относительно небольшого различия расходов максимальной производительности  $Q_b$  и гарантированного  $Q_p$  дифференцированные правила в этом конкретном случае могут не разрабатываться. В рассматриваемом примере ввиду изложенного правила расходования избытков при наполнении водохранилища должны сводиться к тому, что при выходе с наполнением за верхнюю противоперебойную линию отдача сразу повышается до величины  $Q_b = 3300 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Координаты конца ветви сработки противосбросовой линии определились сроком раннего начала половодья—15/IV и диспетчерской емкостью сработки водохранилища на эту дату— $14,8 \text{ км}^3$ . Ординатой начала ветви сработки является наполненное водохранилище— $16,0 \text{ км}^3$ , а абсцисса ее найдена подбором, исходя из (1.7). Таким же путем определены и абсциссы начала линий, разграничивающих зону избытков на подзоны. Расчет противосбросовой линии и определение величин отдачи в подзонах зоны избытков выполнен в табл. 4.7.

Расход в подзоне, смежной с зоной гарантированной отдачи, определен как средний между гарантированным и расходом в ближайшей подзоне

$$\frac{1140 + 1450}{2} \approx 1300 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Таблица 4.7

Период сработки $T$ , мес.	Сроки сработки	Средний сток фазы, $\text{км}^3$	Модульный коэф- фициент расчет- ного года $K_{5\%}$	Объем расчетно- го стока $Q$ (пр) $T$ , $\text{км}^3$	Объем отдачи, $\text{км}^3$	Расходы отдачи, $\text{м}^3/\text{сек}$	
						вычис- ленный	принятый
2,0	16/II—15/IV	1,7	1,35	2,3	17,3	3300	3300
2,5	1/II—15/IV	2,1	—	2,1	17,1	2600	2600
3,5	1/I—15/IV	3,1	—	3,1	18,1	1970	2000
4,5	1/XII—15/IV	4,3	—	4,3	19,3	1630	1650
5,5	1/XI—15/IV	5,8	—	5,8	20,8	1440	1450

**Зона ограничений.** Расчет второй ступени урезанной отдачи и построение ее верхней границы ведется на обеспеченность 99%.

Годовой сток, соответствующий обеспеченности 99%, равен  $30,6 \text{ км}^3$ . Если принять за начало водохозяйственного года 15/IV, что отвечает раннему началу половодья, и ввести ограничение через 1,5 месяца после этой даты, т. е. с 1/VI, то по (3.7) расход второй ступени урезанной отдачи составит  $Q_{y_2} = 940 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Для расчета верхней границы этой ступени отобрано 6 лет. После приводки расходов этих лет к стоку  $30,6 \text{ км}^3$  в таблице, подобной 1.7 и 2.7, проведены расчеты ходом назад линий наполнения — срабатывания водохранилища от конца сработки до даты 1/VI, с которой вводятся ограничения. Результаты расчетов нанесены на рис. 5.7 г. Верхняя огибающая принимается за верхнюю границу второй ступени урезанной отдачи.

Аналогичным образом выполнен расчет и третьей ступени урезанной отдачи, исходя из обеспеченности 99,5%. Величина этой отдачи определилась равной  $Q_{y_3} = 880 \text{ м}^3/\text{сек}$ ; ее верхняя граница показана на рис. 5.7 д.

Величина первой ступени урезанной отдачи определена по интерполяции между отдачей гарантированной и второй ступени и составила  $Q_{y_1} = 1040 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

Построенные выше отдельные элементы сведены в один общий чертеж, представленный на рис. 6.7, который и является искомым диспетчерским графиком управления работой водохранилища для глубокого сезонного регулирования (на рис. 6.7 цифрами обозначены отвечающие каждой зоне регулируемые расходы).

Порядок применения диспетчерских графиков к расчетам регулирования очень прост и заключается в следующем.

По известному наполнению водохранилища в начале расчетного интервала времени в соответствии с диспетчерским графиком назначается зарегулированный расход на данный интервал,

а по нему и по заданному притоку определяется приращение наполнения водохранилища, а затем и самонаполнение в конце интервала. Полученное наполнение является исходным для расчета следующего интервала. Если на протяжении расчетного интервала наполнение водохранилища и соответственно предусматриваемая диспетчерским графиком отдача резко меняются, необходимо уменьшить интервал. За счет этого сгладятся переходы к повышенной или пониженной отдаче.

#### § 5. ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ ПРИ МНОГОЛЕТНЕМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Для решения основной задачи многолетнего регулирования — обеспечения гарантированной отдачи в предвидении расчетного периода маловодных лет — необходимо к началу водохозяйственного года, т. е. на начало половодья, по возможности иметь водохранилище наполненным на величину многолетней емкости.

Отсюда вытекает, что если водохранилище в данном году было наполнено до НППГ, к концу межени этого года оно не должно срабатываться более чем на величину сезонной составляющей емкости. В то же время, если межень многоводна, замедлится опорожнение водохранилища и появится опасность несработки сезонной емкости. В этом случае должно быть предусмотрено повышение отдачи сверх гарантированной величины за счет использования избыточного наполнения водохранилища в пределах сезонной составляющей емкости. При наполнениях же водохранилища в пределах многолетней емкости переходящий запас воды сохраняется из года в год на случай наступления маловодных лет и отдача здесь поддерживается на уровне гарантированной.

Работа водохранилища при многолетнем регулировании принимается по следующей схеме.

Полезная емкость водохранилища срабатывается в результате наступления критического периода. В состав этого периода входят маловодные годы с суммарным дефицитом, равным величине многолетней емкости, и межень предшествующего им года с дефицитом, равным величине сезонной составляющей емкости. Если по окончании полной сработки полезной емкости пойдут многоводные годы, начнется наполнение водохранилища, а если за критическим периодом будут следовать маловодные годы — перебой в гарантированной отдаче (ограничения).

В соответствии с этой схемой работы водохранилища при многолетнем регулировании и ведется расчет элементов диспетчерских графиков.

Зона гарантированной отдачи очерчивается двумя противоперебойными линиями: верхней, отделяющей ее от зоны избытков, и нижней, отделяющей ее от зоны урезанной отдачи.

Верхняя противоперебойная получается построением верхних огибающих линий сработки и наполнения водохранилища в годы, предшествующие началу опорожнения многолетней емкости. В такие годы, что ясно из изложенного, сработкой и наполнением охватывается лишь сезонная составляющая емкости, занимающая самое верхнее положение в водохранилище, т. е. над многолетней составляющей. Следовательно, ветвь сработки начинается от полного водохранилища (от НПП) в начале межени и заканчивается на уровне многолетней емкости в конце межени, т. е. перед половодьем первого года критического маловодья.

Расчет ветвей сработки и наполнения ведется отдельно, поскольку для ветви наполнения, как правило, необходимо строить две линии: при раннем и позднем половодьях. Для построения указанных ветвей отбирается ряд лет, обладающих суммарным стоком, близким к гарантированной отдаче. После приводки расходов отобранных лет к величине этой отдачи ходом назад рассчитываются (в таблицах, подобных 1.7 и 2.7) линии сработки и наполнения.

Помимо основной задачи — построения верхней противоперебойной линии, ветвью сработки уточняются размеры сезонной составляющей емкости, а ветвью наполнения определяются объемы возможного накопления половодного стока и соответственно размеры обязательной предполоводной сработки водохранилища.

Нижняя противоперебойная линия, в соответствии с выполняемой ею ролью, своими концами опускается до полностью опорожненного водохранилища.

Для внесения определенности в вопрос перехода к ограничениям, так же как и при сезонном регулировании, отдача на уровне гарантированной сохраняется в течение 1—3 месяцев и более (см. § 4) после начала половодья (начала наполнения водохранилища) независимо от состояния наполнения водохранилища.

В соответствии с этим нижняя противоперебойная представляется одной непрерывной линией, начинающейся при сработанном водохранилище в конце водохозяйственного года, и ходом назад рассчитываемой до даты на подъеме половодья, до которой с начала наполнения отдача поддерживается равной гарантированной (подобно рис. 5.7 *г* и *д*). При этом, поскольку нижняя противоперебойная линия является нижней границей гарантированной отдачи, она, очевидно, должна строиться как нижняя огибающая линий наполнения — срабатывания водохранилища, построенных по ряду лет со стоком, равным гарантированной отдаче, и при этой отдаче.

Установив таким образом границы зоны гарантированной отдачи — верхнюю и нижнюю, переходят далее к построению остальных элементов диспетчерского графика.

Прежде всего отметим, что условия работы водохранилища в зоне избытков мало зависят от глубины регулирования и потому порядок расчета и построения элементов диспетчерских графиков в этой зоне, подробно рассмотренный применительно к сезонному регулированию (см. § 4), остается в силе и при многолетнем регулировании.

Порядок расчета элементов диспетчерских графиков в зоне ограничений при многолетнем регулировании в общем также не меняется по сравнению с глубоким сезонным регулированием. Назначается три (или более) ступени урезанной отдачи и по выражению (3.7) определяются их величины (второй и третьей ступени<sup>1</sup>), а затем по ряду лет со стоком, отвечающим заданной обеспеченности — 99% и 99,5% (или каким-то другим обеспеченностям — см. выше), строятся линии наполнения—срабатывания водохранилища (аналогично рис. 5.7 *г* и *д*), верхние огибающие которых и принимаются за верхние границы выделенных ступеней урезанной отдачи.

При определении годового стока, вводимого в расчет ступеней урезанной отдачи  $\Gamma_{p_{y_2}}$  и  $\Gamma_{p_{y_3}}$ , следует учесть различие в условиях работы водохранилища при многолетнем регулировании. При сезонном регулировании, как уже отмечалось, величины отдачи за пределами расчетной обеспеченности устанавливаются по стоку лет, взятых с кривой обеспеченности естественного стока, поскольку работа водохранилища замыкается внутри каждого года и на смежные годы влияния не оказывает. При многолетнем же регулировании величины отдачи за пределами расчетной обеспеченности должны устанавливаться по годовому стоку, взятому с кривой обеспеченности, отражающей работу водохранилища за длительный многолетний период. Эта кривая в пределах расчетной обеспеченности  $p$  задается условиями задачи, а за ее пределами может быть построена способами, указанными в § 7 главы 6.

Кроме основных линий, разделяющих зону ограничений на ступени урезанной отдачи и получаемых указанным выше расчетом, по интерполяции могут быть выделены более мелкие градации, назначение которых, как отмечалось, смягчить переход к меньшему значению урезанной отдачи.

Далее, полученные расчетом отдельные элементы komponуются на одном чертеже — диспетчерском графике.

Если водохранилище ведет регулирование на удовлетворение запросов нескольких потребителей с различной обеспеченностью, зона гарантированной отдачи, ограниченная верхней и нижней противоположными линиями, подлежит делению на подзоны, в пределах которых подается вода тем или иным потребителям.

<sup>1</sup> Величина урезанной отдачи первой ступени находится по интерполяции между отдачей гарантированной и второй ступени.

Для построения линий, разделяющих эту зону на подзоны, прежде всего необходимо произвести разделение общей емкости водохранилища, осуществляющего многолетнее регулирование, или ее многолетней составляющей на части (см. на рис. 3.7 в величины  $bb'$ ,  $b'b''$  и  $b''h$ ), при заполнении которых должна поддерживаться заданная отдача. Указанное разделение емкости водохранилища на части осуществляется с помощью методов, рассматриваемых в § 4 главы 8. Сами же линии строятся анало-

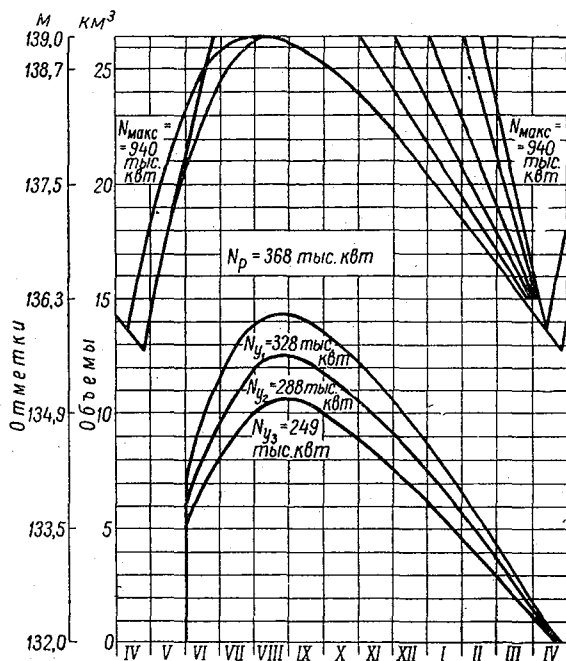


Рис. 7.7. Диспетчерский график при многолетнем регулировании мощности.

гично противоперебойным, отбирая для этой цели, как и прежде, годы со стоком, равным регулируемой отдаче.

При энергетическом использовании стока диспетчерскими графиками обычно регламентируется отдача не в виде расходов, а в виде мощностей, средних для каждой зоны. В таком случае при отборе характерных лет для построения линий, разграничивающих зоны диспетчерского графика, следует учесть влияние на напоры уровней верхнего и нижнего бьефов и соответственно корректировать величины стока, используемые при построении этих линий.

В качестве примера на рис. 7.7 показан диспетчерский график при многолетнем регулировании мощности.

Водохранилище создается плотиной с гидроэлектростанцией при ней. Полезная емкость водохранилища составляет  $26,4 \text{ км}^3$ , что по отношению к среднему годовому стоку в створе плотины  $49,5 \text{ км}^3$  дает 53%. При обеспеченности 95% эта емкость позволяет осуществить многолетнее регулирование с коэффициентом  $\alpha=0,88$  (коэффициент изменчивости годового стока  $C_v=0,20$ ).

Высота призмы сработки водохранилища равна 7,0 м. Средний напор составляет 39,2 м (за критический период сработки водохранилища).

При коэффициенте регулирования  $\alpha=0,88$  отдача брутто из водохранилища составляет  $43,5 \text{ км}^3$ , а за вычетом отъемов воды на неэнергетические нужды и потерь— $34,8 \text{ км}^3$ , что дает гарантированный расход нетто на ГЭС  $1100 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Этот расход, использованный на напоре в 39,2 м, обеспечивает мощность 368 тыс. квт.

Задавая работу установки на выровненную гарантированную мощность 368 тыс. квт, приходилось менять расход в соответствии с изменением напоров, в основном связанным с колебанием уровней водохранилища при наполнении и сработке. Поэтому при расчете верхней противоперебойной линии, расположенной на чертеже в верхней части емкости, выбирались годы со стоком меньшим, чем при расчете нижней противоперебойной, конец которой уходит к полностью опорожненному водохранилищу. Естественно, что границы зоны ограничений также рассчитывались при учете низких уровней водохранилища, а следовательно, и малых напоров.

Соответственно при расчете линий диспетчерского графика в избыточной зоне принималось во внимание большое наполнение водохранилища, а следовательно, и большие напоры.

## § 6. ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ, РЕГЛАМЕНТИРУЮЩИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗЫТКОВ

Очень удобной формой диспетчерских графиков, регламентирующих использование избытков, следует признать графики, связывающие наполнения водохранилища на контрольные даты, например на первые (или иные) числа месяцев, с величинами расходов, назначаемых потребителям на предстоящий отрезок времени до следующей контрольной даты. Такие графики, представленные рядом лучей, могут применяться как при сезонном, так и при многолетнем регулировании стока и энергоотдачи.

Вид этих графиков показан на рис. 3.7 г (см. стр. 253). Они строятся следующим образом.

На оси абсцисс откладываются величины зарегулированных расходов (мощностей), а на оси ординат — наполнения водохранилища (в  $\text{м}^3$  или в энергетическом эквиваленте — в квт-ч, см. главу 9).



Зарегулированные расходы определяются суммой гарантированного расхода  $Q_p$  и расхода избытков  $\Delta Q$ . Последний находится как частное от деления избыточных запасов воды в водохранилище  $\Delta V$  на время  $T$ , в течение которого намечается использовать эти избытки

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{T}. \quad (6.7)$$

Таким образом, добавочные расходы пропорциональны избыточным запасам воды водохранилища. Отсюда зависимости зарегулированных расходов от наполнений водохранилища могут быть представлены прямыми линиями (лучами).

Лучи, регламентирующие использование избытков, начинаются на вертикальной линии с абсциссой, равной гарантированному расходу  $Q_p$ . Ординатами начала лучей, приуроченных к определенным контрольным датам, служат диспетчерские емкости наполнения водохранилища  $V_d^H$ , установленные по верхней противоперебойной линии. Ординатами конца лучей является полная полезная емкость водохранилища, а абсциссами — максимальные величины зарегулированных расходов, равные сумме гарантированного и максимального избыточного

$$Q_{\max} = Q_p + \Delta Q_{\max}. \quad (7.7)$$

Второе слагаемое  $\Delta Q_{\max}$  представляет собой ту максимальную добавку к основному расходу  $Q_p$ , которая может быть получена в результате использования наибольших избытков, накопленных в водохранилище к началу контрольной даты. Очевидно, они могут иметь место лишь в том случае, если на каждую контрольную дату водохранилище окажется доверху наполненным. Это может случиться в результате очень высокого притока в предшествующее контрольной дате время. Тогда наибольшими избытками явятся разности  $\Delta V_{\max}$  между полной емкостью  $V$  и диспетчерской емкостью наполнения водохранилища  $V_d^H$

$$\Delta V_{\max} = V - V_d^H. \quad (8.7)$$

Соответственно максимальные расходы избытков будут равны

$$\Delta Q_{\max} = \frac{\Delta V_{\max}}{T}. \quad (9.7)$$

Необходимо отметить, что совмещение начала всех лучей в одной общей абсциссе, как принято выше, будет отвечать условию, когда в расчетном маловодном году гарантируется постоянный расход. Если же в маловодном году намечается обеспечить переменный расход, например в целях поддержания постоянной мощности ГЭС, верхним бьефом которой является водохранилище, абсциссы начала лучей будут разными, соответственно принятому порядку изменения расхода в процессе сработки во-

водохранилища. Эта переменность гарантированного расхода прежде всего должна быть учтена при построении верхней противоперебойной линии, ординаты которой являются ординатами начала лучей диспетчерского графика.

Выше изложен порядок расчета и построений применительно к графикам для периода сработки водохранилища. Этот порядок в основном сохраняется и в графиках для периода наполнения со следующей разницей. Поскольку для ветви наполнения противоперебойной линии обычно принимается скользящая шкала времени, лучи графика ориентируются не на календарные даты, а на определенные сроки, отсчитываемые от нуля скользящей шкалы: на 10-й, 20-й день и т. д. При этом за основу расчетов берется противоперебойная линия, относящаяся к ранним половодьям. В том же случае, когда существенной разницы во времени прохождения волны половодий не наблюдается и ветвь наполнения противоперебойной линии строится одна, лучи графика также могут ориентироваться на календарные даты.

Основным условием пользования рассматриваемыми диспетчерскими графиками для периода сработки является наличие к началу межени доверху наполненного водохранилища или выход в процессе сработки в зону избытков диспетчерского графика.

Сработка водохранилища начнется с момента, когда приток станет меньше  $Q_p$ . Если начало межени многоводно, сработка водохранилища задержится и начнется тем позже, чем многоводнее межень. В случае большой задержки начала сработки избыточный сток будет значительным и сработка водохранилища начнется максимальными для соответствующей начальной даты расходами, что вытекает из существа самих графиков.

Поскольку основной для построения диспетчерского графика явилась верхняя противоперебойная линия, рассчитанная по маловодной межени, при большом последующем притоке появляются дополнительные избытки (представляющие разность между фактическим притоком и расчетным), постепенно накапливающиеся в водохранилище.

Объем дополнительных избытков будет зависеть от принятого порядка расходования избытков (см. ниже), и если их принято расходовать в течение всего оставшегося времени до конца сработки водохранилища, они будут наибольшими. Так как в каждом отдельном году избытки различны и будут определяться ходом стока реки, очевидно, предусмотреть их заранее невозможно. Поэтому, чтобы избежать непроизводительного расходования избытков, в конце периода сработки водохранилища необходимо отдачу корректировать на основе краткосрочных прогнозов. При этом достаточно знать лишь время наступления половодья (т. е. резкого перелома в питании реки), чем и определится момент окончания сработки водохранилища.

С момента получения прогноза о начале половодья (заблаговременностью 1,5—2 месяца при глубоком регулировании и в 0,5—1 месяц при неглубоком регулировании) сработка оставшихся запасов воды (энергии) ведется равномерным расходом с расчетом на опорожнение водохранилища до диспетчерской емкости к началу половодья.

При построении диспетчерских графиков рассматриваемой формы необходимо учесть еще одно положение.

При значительных размерах полезной емкости и при недостаточно интенсивном использовании избытков в отдельные очень многоводные годы возможны скопления больших запасов воды (энергии) к концу сработки водохранилища. Чтобы исключить в такие годы недосработки водохранилища, и как следствие, устранить непредусмотренные планом водного хозяйства сбросы, на диспетчерских графиках следует показывать границу возможного увеличения полезно используемого расхода до максимальной производительности водопотребляющих установок —  $Q_v$  (на рис. 3.7 *г* показана штриховкой). Нетрудно видеть, что указанная граница идентична противосбросовой линии, принятой для диспетчерских графиков ранее рассмотренной формы.

**Длительность использования избытков.** В вопросе о наиболее целесообразной длительности использования избытков до настоящего времени нет полной ясности.

В проведенных автором исследованиях рассматривались три варианта длительности использования избытков в период сработки водохранилища сезонного регулирования. По первому из них избытки использовались в течение всего оставшегося времени до конца сработки водохранилища. По второму варианту избытки использовались в течение двух последующих месяцев. По третьему варианту эти избытки использовались в течение одного месяца, т. е. в течение такого же отрезка времени, за который они накопились.

Режим водотока, на базе гидрологических данных которого велись указанные исследования, характеризуется тем, что начало межени в среднем приурочено к 1/X, а конец к 15/IV. Если контрольные даты относить к границам месяцев, то первой контрольной датой будет 1/XI. Отсюда при использовании избытков в течение всего оставшегося времени до конца сработки водохранилища (первый вариант) расчетная длительность использования избытков составит: с 1/XI — 5,5 месяца, с 1/XII — 4,5 месяца, с 1/I — 3,5 месяца и т. д.

Выполненные исследования позволили сделать вывод, что целесообразная длительность использования избытков зависит от глубины регулирования стока и целей регулирования.

**При регулировании расходов.** Когда назначением регулирования является предельное выравнивание расходов, наилучший эффект дает длительность использования избытков в течение

двух месяцев (второй вариант). Этот вывод одинаково справедлив как в случае неглубокого, так и в случае глубокого сезонного регулирования стока.

**При энергетическом регулировании.** Когда в задачу регулирования стока входит обеспечение работы гидроэлектрической станции, то в зависимости от глубины регулирования и требований энергопотребителей наибольшему эффекту отвечают различные длительности. Если основным требованием энергопотребителей является наибольшее выравнивание мощностей ГЭС, то при неглубоком сезонном регулировании этому отвечает длительность использования избытков в течение двух месяцев. Этому же требованию энергопотребителей при глубоком регулировании стока отвечает длительность использования избытков в течение всего периода, оставшегося до конца сработки водохранилища.

Однако при регулировании стока в энергетических целях вряд ли нужно добиваться предельного выравнивания мощностей, поскольку график электрической нагрузки в течение года не остается постоянным и снижается от зимы к лету. Максимум нагрузки обычно приходится на декабрь—январь и поэтому при регулировании желательно в эти месяцы обеспечить повышенные расходы и мощности ГЭС. В этом отношении при неглубоком регулировании очень хорошие результаты получаются при использовании избытков в течение одного месяца. Требованию иметь более высокие мощности в декабре и январе при глубоком регулировании отвечает длительность в течение 2 месяцев.

Для наглядности приводится итоговая табл. 5.7 результатов исследований, в которой наиболее целесообразная длительность использования избытков отмечена знаком плюс (+).

Таблица 5.7

Цель регулирования	Глубина сезонного регулирования	Длительность использования избытков		
		до конца сработки	в течение двух месяцев	в течение одного месяца
Выравнивание расходов	глубокое неглубокое		+	
Выравнивание мощностей	глубокое неглубокое	+	+	
Повышенные мощности в XII и I	глубокое неглубокое		+	+

По масштабам избытков рассмотренный выше случай глубокого сезонного регулирования, очевидно, будет мало отличаться от многолетнего регулирования и потому полученные выводы о целесообразности длительности их использования с некоторым приближением могут быть распространены и на многолетнее регулирование.

В заключение отметим, что, поскольку при расчете отдачи в зоне избытков ранее рассмотренной формы диспетчерских графиков в координатах время — наполнение водохранилища конец всех линий, разграничивающих зону повышенной отдачи на подзоны, ориентирован на конец периода сработки сезонной емкости (§ 4 и 5), этой форме графиков соответствует первый вариант длительности реализации избытков диспетчерских графиков в координатах расход — наполнение водохранилища (§ 6), т. е. вариант использования избытков в течение всего времени, оставшегося до конца сработки сезонной емкости водохранилища. Поэтому, когда длительность использования избытков в течение оставшегося времени до конца сработки водохранилища удовлетворяет поставленной перед регулированием задаче (см. табл. 5.7), можно ограничиться в зоне избытков построением первой формы диспетчерского графика (по § 4 и 5). В противоположном случае для зоны избытков необходимо составлять диспетчерский график по второй форме при учете требуемой длительности расходования избытков (по § 6).

Рассмотренная выше методика расчетов и построения диспетчерских графиков применительна к водотокам со снеговым половодьем и сохраняет силу также для водотоков с половодьем от затяжных дождей. В этом случае верхние огибающие линий наполнения — срабатывания водохранилища будут одновременно отражать и срок наступления половодья и его растянутость.

## **§ 7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОЗОВ СТОКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОДОХРАНИЛИЩ**

Прогнозы стока позволяют уточнять даваемые диспетчерскими графиками решения и тем самым повышают эффект регулирования. Это уточнение сводится к тому, что, предвидя в процессе эксплуатации особенности предстоящего гидрологического режима водотока, можно приспособить к нему работу установки: принять заблаговременно меры против ожидаемых наводнений, предусмотреть рациональный порядок расходования имеющихся в водохранилище запасов воды перед наступлением исключительного маловодья и т. п. Учет прогнозов при проектировании позволяет уменьшить размеры сооружений и более точно оценить их народнохозяйственный эффект.

При эксплуатации и проектировании водохозяйственных установок наибольшее значение имеет прогноз режима расходов

воды и в особенности прогноз элементов половодья: объема, величины максимума, формы гидрографа, сроков начала и конца половодья, времени прохождения пика. Имея сведения об ожидаемом половодье (при достаточно высокой точности и заблаговременности прогноза), можно внести коррективы в режим предполоводной сработки водохранилища, назначить порядок сброса излишков воды и т. п.

При многолетнем регулировании можно изменять по годам глубину предполоводного опорожнения водохранилища, допуская более глубокую сработку перед многоводными половодьями. Это обеспечит большее задержание водохранилищем избыточного стока и как следствие — уменьшение холостых сбросов.

При сезонном регулировании вследствие ежегодного предполоводного опорожнения водохранилища независимо от многоводности половодья такая возможность отсутствует. Тогда прогнозы будут использоваться лишь в отношении предвидения времени прохождения половодья. При заранее известном сроке прохождения половодья отпадает необходимость сохранять в водохранилище запасы воды на случай запаздывания половодья, чем также достигается уменьшение холостых сбросов.

Поскольку одной из основных задач диспетчерских графиков является обеспечение работы установки на гарантированной отдаче, величина которой устанавливается по наиболее низкому маловодью (в пределах расчетной обеспеченности), предвидение стока за маловодные периоды не повышает обеспеченности гарантии; оно позволяет лишь увеличить использование избытков (т. е. также приводит к уменьшению холостых сбросов) или смягчить глубину перебоев.

При реализации прогнозов из осторожности принимают во внимание не наиболее вероятные значения ожидаемого стока, а величины его, исправленные на вероятную ошибку прогноза. Последняя берется с таким знаком, который обеспечивает необходимый запас в результатах: с плюсом при оценке многоводного стока и с минусом — при оценке маловодного.

Учет прогнозов при регулировании сводится к сопоставлению ожидаемой величины стока (с поправкой соответствующего знака) со стоком, определившим ту или иную линию диспетчерского графика. При превышении прогнозируемого стока над диспетчерским появляется возможность использования дополнительных избытков, а при обратном соотношении, наоборот, появляется необходимость уменьшить используемый сток по сравнению с величиной, диктуемой диспетчерским графиком.

Признавая важность и желательность прогнозов, необходимо все же иметь в виду их невысокую точность и недостаточную заблаговременность, в силу чего на настоящем этапе развития прогнозов приходится в основном пользоваться диспетчерскими графиками без учета прогнозов.

## Литература

1. Потапов М. В. Регулирование стока. Сочинения, т. III, Сельхозгиз, М., 1951.
2. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеониздат, Л., 1952.
3. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. и Коренистов Д. В. Правила управления работой водохранилищ, обслуживающих гидроэлектрические станции. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 4, АН СССР, 1950.
4. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Ущерб от ограничений водопотребления как фактор, определяющий целесообразные размеры водохозяйственных установок. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 4, АН СССР, 1950.
5. Ляпичев П. А. Методика регулирования речного стока. Гос. изд. литературы по строительству и архитектуре, М., 1955.

## ГЛАВА ВОСЬМАЯ

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НА РАЗЛИЧНЫЕ ФОРМЫ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Дальнейшее развитие методики статистического расчета характеризовалось стремлением распространить ее на различные формы водохозяйственного использования, не ограничиваясь простейшими задачами регулирования на жесткий график потребления. К таким формам водохозяйственного использования относятся задачи регулирования стока на переменную отдачу не только внутри года, но и в течение многолетнего периода. Одновременно предстояло решить вопросы: а) учета в расчетах регулирования внутригодовой неравномерности стока, что позволило бы отойти от принимаемого упрощения расчета с условным делением емкости водохранилища на составляющие части — многолетнюю и сезонную, и рассматривать емкость как единое целое, и б) учета влияния на условия регулирования коррелятивных связей между смежными по времени величинами стока.

Решение этих вопросов дано С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем в работе [1] и др. Используя математическую схему расчета А. Д. Саваренского (см. главу 6), они исходят из следующих предпосылок: а) годовой цикл рассматривается состоящим из последовательно сменяющихся фаз; б) сток за фазы и его изменчивость устанавливаются обычными статистическими методами; в) внутрифазовое распределение стока принимается по типовым гидрографам; г) связь между стоком за смежные фазы оценивается коэффициентами корреляции.

Ввиду относительной сложности расчета по излагаемому методу стремятся, по возможности, к сокращению числа выделяемых в годовом цикле фаз. Поэтому обычным является деление года на две резко различающиеся по стоку фазы — поло-



водную и меженную, что характерно для большинства рек СССР. В отдельных же случаях, когда это вызывается требованиями решаемой водохозяйственной задачи или особенностями гидрологического режима водотока, число выделяемых фаз увеличивается, например год делится на четыре фазы: весна, лето, осень, зима и т. д.

В связи с делением года на фазы особое значение приобретает вопрос об учете в расчетах межфазовых коррелятивных связей, теснота которых повышается по мере сокращения длительности фаз.

Если условиями водопотребления не диктуется разбивка годового цикла на фазы (когда отдача внутри года не меняется), то такая разбивка осуществляется только в соответствии с режимом водотока.

Для одной и той же реки и створа фазы как по объемам стока и длительности, так и по календарным срокам начала и окончания не являются одинаковыми во все годы и варьируют в зависимости от хода гидрометеорологической обстановки в различные годы. Однако учитывая технические трудности ведения водохозяйственных расчетов по фазам, отражающим индивидуальные особенности хода стока в каждом году, приходится жестко закреплять границы начала и конца фаз календарными датами. При этом, чтобы не исказить характеристики меженного стока за счет включения в межень части половодного стока в годы с ранним началом и поздним окончанием половодий, разбивка года на фазы производится с таким расчетом, чтобы половодная фаза, по возможности, включала бы все случаи раннего начала и позднего окончания половодий.

В соответствии с этим может оказаться несколько преуменьшенной сезонная емкость водохранилища, в том числе и при определении ее по формулам (см. гл. 6, § 6), что потребует некоторого увеличения емкости для возможности обеспечить отдачу и в случае раннего начала и позднего окончания межени (см. также гл. 7, § 3 и 4). При пользовании формулами это могло бы быть учтено соответствующим корректированием параметров  $t_m$  и  $m_m$ , ориентируясь на характерные в этом смысле годы. Подобным же образом (в случае надобности) можно уточнить емкость водохранилища и при расчетах по излагаемым в настоящей главе методам.

Календарные границы фаз устанавливаются анализом ежедневных естественных расходов применительно к намечаемым величинам зарегулированных расходов. Установленные таким образом границы, если они близки к границам календарных месяцев, допускается (для упрощения расчетов) совмещать с границами последних. В иных случаях эти границы совмещаются с границами декад или пятидневок.

Для лучшего уяснения методики расчета по фазам годового

цикла вначале рассмотрим ту же простейшую задачу регулирования на жесткий график потребления с последующим переходом к более сложным задачам регулирования на переменную отдачу с различным процентом обеспеченности. При этом будем исходить из деления года на две фазы: половодную и межвенную. Примененная здесь методика расчета может быть распространена и на случаи деления года на большее число сменяющихся друг друга фаз без каких-либо изменений и дополнений. Расчет по фазам годового цикла в практическом отношении удобнее вести по абсолютным величинам стока, отдачи и емкости водохранилища. Поэтому изложение методики и последовательности расчета дается на конкретном гидрологическом материале.

## § 2. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ФАЗАМ ГОДОВОГО ЦИКЛА

Пусть будут заданы статистические параметры фазового стока, отдача и полезная емкость водохранилища. Требуется определить обеспеченность, с которой будет гарантироваться заданная отдача.

Исходные данные:

	Фаза $x$ (половодная)	Фаза $y$ (межвенная)
Длительность, мес. . . . .	2	10
Средний сток (норма), млн. $m^3$	193	17
$C_v$ . . . . .	0,80	0,50
$C_s = 2C_v$ . . . . .	1,60	1,00
Отдача $A$ млн. $m^3$ . . . . .	20	100
Емкость водохранилища $V = 260$ млн. $m^3$		

Межфазовая коррелятивная связь для упрощения во внимание не принимается.

Расчет основан на построении кривых обеспеченности наполнений водохранилища, переходя от одной фазы к другой. Начнем с многоводной фазы  $x$ , причем для простоты изложения к началу расчета водохранилище принимается пустым.

Последовательность построений сводится к следующему. На кривую обеспеченности стока за фазу  $x$  (рис. 1.8  $a$ ) от оси абсцисс откладывается отдача  $A_x = 20$ , а над нею свободная емкость водохранилища  $V = 260$ . По соображениям, изложенным в § 3, гл. 6, в результате этих построений получается кривая распределения вероятностей наполнений водохранилища в конце фазы  $x$  первого года расчета (ее контуры совпадают с верхней границей заштрихованной фигуры), которая одновременно является и кривой распределения вероятностей начальных наполнений фазы  $y$ . Чтобы осуществить расчет в фазу  $y$ , необходимо

общую кривую распределения вероятностей начальных наполнений водохранилища заменить частными (см. гл. 6, § 3) и последовательно начальные наполнения сложить со стоком минус отдача. Такая замена общей кривой частными проведена на рис. 1.8 б (6 частных кривых с весом основания каждой от  $n_6 = 0,04$  до  $n_1 = 0,22$ ), а сложение — на рис. 1.8 в.

Для сложения начальных наполнений водохранилища со стоком минус отдача применим другой способ по сравнению с тем, который применялся в § 3, гл. 6. Этот способ, как показывает практика, обеспечивает большую точность расчетов и заключается в следующем. Абсциссы кривой обеспеченности стока за рассматриваемую фазу не приводятся к весу оснований частных кривых начальных наполнений, как прежде, а, наоборот, основания кривых начальных наполнений приводятся к основанию исходной кривой обеспеченности стока, т. е. к единице. Иначе говоря, расчет ведется на полной кривой обеспеченности стока за фазу.

Тогда, отложив на кривой обеспеченности стока отдачу  $A_y = 100$ , а над нею частные величины свободной емкости  $a_1, a_2, a_3 \dots$ , определяемые по разности между емкостью  $V$  и частными наполнениями  $V_1, V_2, V_3 \dots$  (рис. 1.8 б), получим возможность провести ряд горизонтальных линий 1, 2, 3... (рис. 1.8 в), отвечающих полной полезной емкости водохранилища (260 млн. м<sup>3</sup>).

Как видно на рис. 1.8 в, отдача  $A_y$  превышает все ординаты кривой обеспеченности стока. Следовательно, в рассматриваемом примере фаза  $y$  полностью дефицитна. Отсюда при любом начальном наполнении водохранилища, включая заполнение всей полезной емкости, к концу фазы  $y$  оно всегда окажется заполненным лишь частично или будет вовсе пустым.

Выполненным построением определились частные кривые обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$ , контуры которых совпадают с кривой обеспеченности стока (на рис. 1.8 в контуры кривых обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$  совмещаются с контурами нижней границы заштрихованной площади, характеризующей сработку водохранилища за эту фазу). Ординаты полученных частных кривых обеспеченности наполнений водохранилища отсчитываются от горизонтальных линий пустой емкости 1', 2', 3'..., располагающихся ниже соответственных линий полной полезной емкости 1, 2, 3... на величину этой емкости (на рис. 1,8 в показаны только те линии пустой емкости, которые вместились над осью абсцисс кривой обеспеченности стока фазы  $y$ ).

Следует иметь в виду, что если фаза  $y$  неполностью дефицитна, в пределах обеспеченностей от 0 до  $r_a$  будут иметь место избытки, которые подобно избыткам в фазу  $x$  пойдут на заполнение свободной емкости водохранилища. В таком случае кон-

туры частных кривых обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$  совпадут: а) в избыточной зоне с контурами верхней границы заштрихованной площади (подобно рис. 1.8 а); б) в дефицитной зоне — с контурами нижней границы заштрихованной площади (подобно рис. 1.8 в).

Расчет в первом году завершается построением общей кривой обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$ .

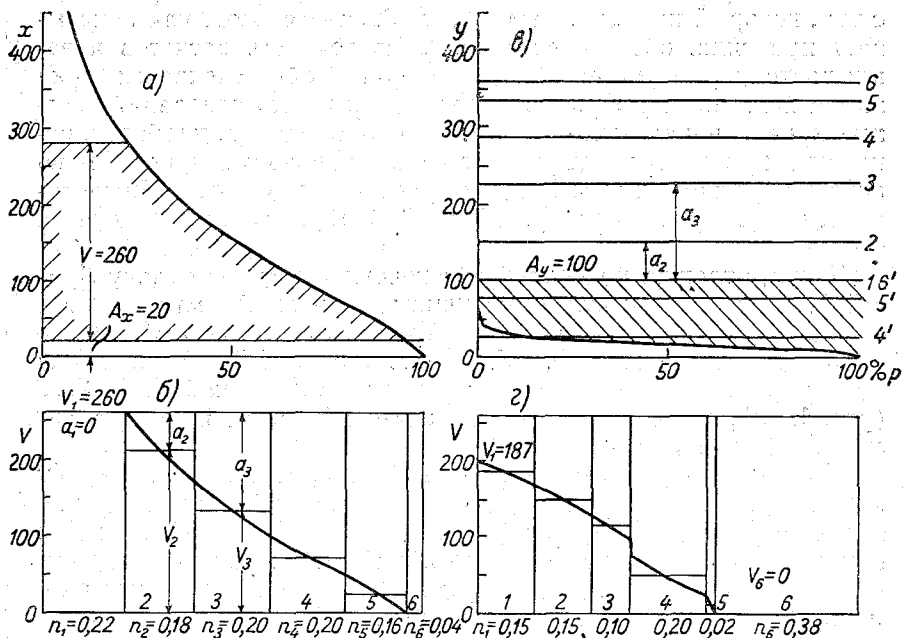


Рис. 1.8. Схема расчета по фазам в первом году.

Чтобы построить эту кривую, необходимо подсчитать абсциссы частных кривых для нескольких значений ординат наполнений от  $V_1 = 260$  до  $V_0 = 0$ . Такой подсчет осуществлен в табл. 1.8, в которой первоначально выписаны абсциссы (в процентах), непосредственно снятые с кривых (рис. 1.8 в), а затем те же абсциссы, приведенные к весу частных кривых начальных наполнений водохранилища  $n_1 = 0,22; n_2 = 0,18$  (см. рис. 1.8 б). Суммы приведенных частных абсцисс и дают абсциссы полной кривой обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$ , представленной на рис. 1.8 г. Чтобы выполнить аналогичный расчет во втором году, нужно полученную кривую обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$  или в начале фазы  $x$  второго года заменить частными (в нашем примере выделено

6 частных кривых с весом от  $n_5=0,02$  до  $n_6=0,38$ , см. рис. 1,8 г) и далее вести расчет как показано — первоначально в фазу  $x$ , а затем в фазу  $y$  второго года, затем третьего года, четвертого и т. д. Расчет продолжается до стабилизации кривых обеспеченности наполнений водохранилища в фазу  $x$  и фазу  $y$  (рис. 28).

Расчет будет считаться законченным, если нулевой ординате стабилизировавшейся кривой обеспеченности наполнений водохранилища маловодной фазы  $y$  отвечает требуемая степень га-

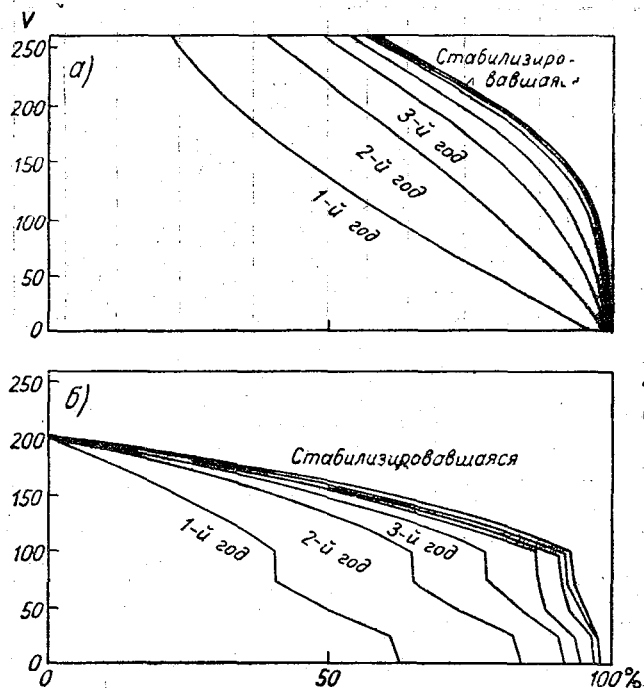


Рис. 2.8. Кривые обеспеченности наполнений водохранилища в конце различных лет расчета за фазу  $x$  (а) и фазу  $y$  (б).

рантии, т. е. обеспеченность  $p$ . При несовпадении полученной расчетом обеспеченности гарантированной отдачи с требуемой по условиям задачи расчет повторяется при измененных исходных данных — величине полезной емкости водохранилища или отдачи (за одну или обе фазы).

Таким образом, учет внутригодовой неравномерности стока путем деления годового цикла на фазы — многоводную и маловодную позволил выполнить расчет по полной полезной емкости водохранилища, не прибегая к условному делению емкости на составляющие части — многолетнюю и сезонную, как это делалось в методах расчета по годовым величинам стока.

Таблица 1.8

Ордината	Абсциссы												
	неприведенные					приведенные							
	1	2	3	4	5	6	$n_1 = 0,22$	$n_2 = 0,18$	$n_3 = 0,20$	$n_4 = 0,20$	$n_5 = 0,16$	$n_6 = 0,04$	сумма
260													0
225	0,3						0,1						0,1
200	2						0,4						0,4
175	60	0,3					13						13,0
150	100	2					22	0,4					22,4
125	100	60					22	10,8					32,8
100	100	100					22	18					40,0
75	100	100	1,5				22	18	0,3				40,3
50	100	100	42				22	18	8,4				48,4
25	100	100	100	0,8			22	18	20	0,2			60,2
0	100	100	100	12			22	18	20	2,4			62,4

### § 3. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ МЕЖФАЗОВЫХ КОРРЕЛЯТИВНЫХ СВЯЗЕЙ

Изложенной в предыдущем параграфе методикой расчета не учитываются коррелятивные связи между стоком за смежные фазы. Между тем при наличии сравнительно тесной связи, как правило, ее необходимо учитывать в расчетах регулирования, поскольку неучет этой связи может исказить результат.

Как уже отмечалось, в колебаниях стока проявляется тенденция к сохранению аномалий, которая заключается в том, что, например, маловодный (или многоводный) год является более или менее маловодным (многоводным) на всем протяжении. Маловодные и многоводные годы обычно образуют группировки.

Тенденция к сохранению аномалий математически выражается в форме коррелятивных связей, в результате которых распределение вероятностей стока одного отрезка времени (года, фазы и т. п.) оказывается связанным с величинами стока за смежный отрезок времени.

В расчетах регулирования наблюдаемая тенденция к сохранению аномалий сказывается в том смысле, что за предшествующим высоким стоком, обеспечивающим большое заполнение водохранилища, вероятнее всего будет иметь место сток последующей фазы тоже относительно высокий. И, наоборот, если предшествующий сток был низкий, который обусловил малое за-

полнение водохранилища, вероятнее всего последующий сток будет также относительно низкий.

Точное решение задачи по учету коррелятивных связей в расчетах регулирования очень сложно. Сложность заключается в том, что если задано значение одного слагаемого  $x$ , вероятность появления различных значений второго слагаемого  $y$  перестает соответствовать исходной кривой обеспеченности. В силу сказанного построение кривых распределения вероятностей конечных наполнений водохранилища при наличии достаточно тесной коррелятивной межфазовой связи нельзя осуществлять по обычным кривым обеспеченности стока, построенным в предположении независимости стока за смежные фазы. Это построение необходимо выполнять по кривым обеспеченности стока с исправленными параметрами.

Упрощенная схема расчета, применяемая в практике проектирования, сводится к следующему.

Для вычисления средних (наиболее вероятных) значений стока последующей фазы, который будем называть частным средним, при учете стока за предшествующую фазу, определившего конечное — начальное наполнение водохранилища, используется уравнение регрессии

$$y = \bar{y} + r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}). \quad (1.8)$$

Среднее квадратическое отклонение частного стока последующей фазы определяется по формуле средней ошибки уравнения регрессии

$$\sigma_y^{(x)} = \sigma_y \sqrt{1 - r_{yx}^2}. \quad (2.8)$$

Здесь  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  — средние значения стока соответственно за предшествующую и последующую фазы;  $x$  и  $y$  — средние значения частного стока за те же фазы;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  — средние квадратические отклонения стока за те же фазы;  $r_{yx}$  — коэффициент корреляции между стоком последующей и предшествующей фазы;  $r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = R_{yx}$  — коэффициент регрессии в уравнении для среднего значения частного стока последующей фазы.

Коэффициенты изменчивости частного стока за последующие фазы могут быть найдены по соотношению

$$C_v = \frac{\sigma_y^{(x)}}{y}. \quad (3.8)$$

Покажем на рассмотренном в предыдущем параграфе примере практические приемы учета межфазовых коррелятивных связей в расчетах регулирования стока.

Для данного конкретного примера связь характеризуется следующими коэффициентами корреляции: между стоком межени ( $y$ )

и предшествующего половодья ( $x$ )  $r_{yx} = 0,70$  и между стоком половодья и предшествующей меженью  $r_{xy} = -0,25$ . Приведенные значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о наличии довольно тесной связи между стоком межени и предшествующего половодья и об отсутствии или, во всяком случае, весьма слабой связи стока за половодье со стоком предшествующей межени. Поэтому в расчетах учтена только связь стока межени со стоком предшествующего половодья.

Величины среднего стока, коэффициентов изменчивости и средних квадратических отклонений равны (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Фаза	Средний сток		Коэффициенты		Среднеквадратическое отклонение	
	обозначение	величина, млн. м <sup>3</sup>	$C_v$	$C_s$	обозначение	величина, млн. м <sup>3</sup>
Половодная . . . . .	$\bar{x}$	193	0,80	1,60	$\sigma_x$	155
Меженная . . . . .	$\bar{y}$	17	0,50	1,0	$\sigma_y$	8,5

Отсюда коэффициент регрессии в уравнении (1.8) для стока межени составит

$$R_{yx} = r_{yx} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 0,70 \frac{8,5}{155} = 0,04$$

и среднее квадратическое отклонение частного стока межени

$$\sigma_y^{(x)} = \sigma_y \sqrt{1 - r_{yx}^2} = 8,5 \sqrt{1 - 0,49} = 6,1 \text{ млн. м}^3.$$

Как и в предыдущем случае, расчет начнем с половодной фазы  $x$  и с пустого водохранилища.

Таблица 3.8

	Частные кривые					
	1	2	3	4	5	6
Вес . . . . .	0,22	0,18	0,20	0,20	0,16	0,04
Средние ординаты конечных наполнений, млн. м <sup>3</sup> . . . . .	260	210	133	75	25	0
Средние ординаты стока, млн. м <sup>3</sup>	425	230	153	95	45	10



Нанося на кривую обеспеченности стока за фазу  $x$  отдачу  $A_x = 20$  млн.  $m^3$  (рис. 3.8 а), а над нею величину емкости (свободной к началу фазы), получим, как и прежде (рис. 1.8), кривую обеспеченности конечных наполнений водохранилища фазы  $x$  первого года расчета. Далее, на этом же рис. 3.8 а выделяем частные кривые конечных — начальных наполнений водохранилища и определяем средние ординаты участков кривой обеспеченности

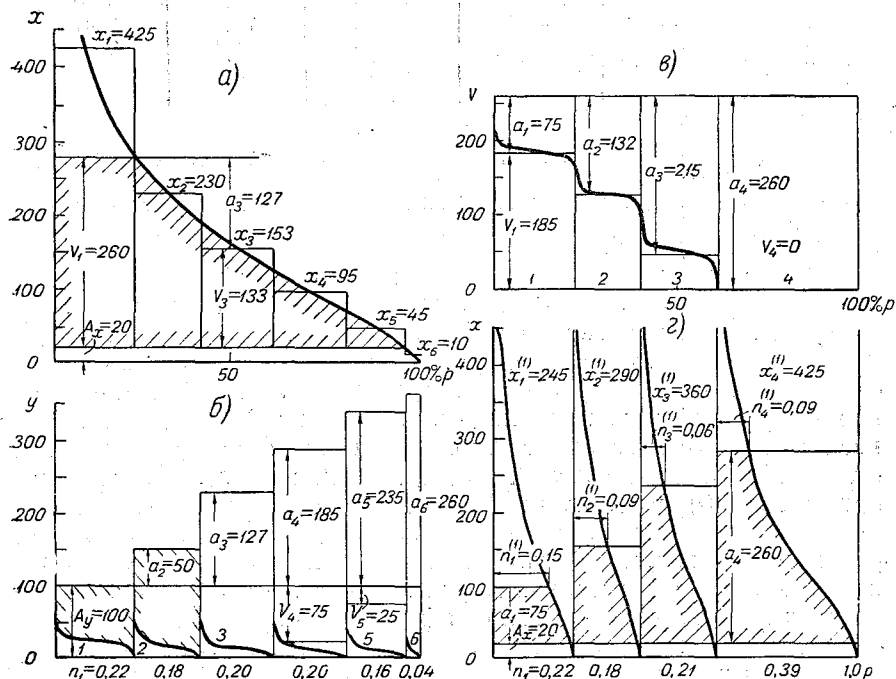


Рис. 3.8. Схема расчета с учетом межфазовых коррелятивных связей в первом году и в фазу  $x$  второго года.

стока фазы  $x$ , определивших то или иное его наполнение. Выделено 6 частных кривых наполнений водохранилища в конце фазы  $x$  с весом оснований от 0,04 до 0,22. Характеристики наполнений и средних ординат участков кривой обеспеченности стока даны в табл. 3.8.

Подставляя в уравнение регрессии (1.8) найденные значения среднего частного стока за предшествующую фазу  $x$ , определим средние частные величины стока за последующую фазу  $y$ , а по формуле (3.8) и коэффициенты изменчивости.

Вычисление параметров частных кривых обеспеченности стока за фазу  $y$  выполнено в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Частная кривая	$x$	$x - \bar{x}$	$0,04 (x - \bar{x})$	$y$	$C_v$
1	425	232	9,3	26,3	0,23
2	230	37	1,5	18,5	0,33
3	153	-40	-1,6	15,4	0,40
4	95	-98	-3,9	13,1	0,47
5	45	-148	-5,9	11,1	0,55
6	10	-183	-7,3	9,7	0,63

Коэффициенты асимметрии принимались исходя из того же соотношения  $\frac{C_s}{C_v}$ , которое установлено для общих кривых обеспеченности и равно 2.

Дальнейшие построения ведутся по исправленным на коррелятивную связь частным кривым обеспеченности стока за фазу  $y$ .

Для наглядности снова используем способ расчета, примененный нами в § 3 главы 6, т. е. кривые обеспеченности стока будем строить на основании, равном основанию частных кривых начальных наполнений водохранилища  $n_1, n_2, \dots$  (рис. 3.8 б). Далее, нанеся на кривые обеспеченности стока отдачу  $A_y = 100$ , а над ней отложив свободные емкости водохранилища  $a_2, a_3, \dots$  (в нашем примере  $a_1 = 0$ ), получим частные кривые обеспеченности наполнений в конце фазы  $y$ . Контуры этих кривых совпадают с контурами нижних границ заштрихованных площадей, характеризующих сработку емкости к концу фазы (штриховка показана только на двух кривых — 1 и 2). Так как фаза очень маловодна, к концу ее водохранилище срабатывается на значительную величину, вследствие чего при малом начальном наполнении оно оказывается совершенно пустым (5 и 6) или почти пустым (4 начальное наполнение).

Суммированием абсцисс частных кривых при нескольких значениях ординат наполнений от полной емкости  $V$  до  $V = 0$  получены абсциссы общей кривой наполнений водохранилища в конце фазы  $y$  первого года расчета.

Общая кривая обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $y$  показана на рис. 3.8 в. Чтобы продолжить расчет во втором году, общая кривая разбита на четыре частных кривых конечных наполнений фазы  $y$  и начальных фазы  $x$ .

Так как в последнем случае связь стока за половежье со стоком предшествующей межени не учитывается ввиду ее незначительности, то расчеты за фазу  $x$  второго, третьего и других лет производятся по обычным кривым обеспеченности стока. Расчеты же за фазу  $y$  основываются, как и в только что рассмотренном

случае, на частных кривых обеспеченности стока с учетом коррелятивной связи со стоком за предшествующую фазу  $x$ . Так как теперь начальное наполнение фазы  $x$  задано в виде ряда частных кривых обеспеченности, условно приведенных к форме ступенек, одним и тем же наполнениям водохранилища в конце фазы  $x$  будут отвечать различные участки частных кривых обеспеченности стока. Объединением этих участков будут получены частные кривые обеспеченности стока, определившие те или иные наполнения водохранилища в конце фазы  $x$ . Средние ординаты объединенных таким образом частных кривых обеспеченности стока за фазу  $x$  и явятся исходными для определения средних величин частного стока фазы  $y$ .

Практическая сторона задачи определения средних величин стока фазы  $x$  заключается в следующем.

На частных кривых обеспеченности стока фазы  $x$ , в данном случае второго года (рис. 3.8 *г*), проводится построение частных кривых обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $x$  при начальных наполнениях, равных конечным наполнениям фазы  $y$  по расчету в первом году (рис. 3.8 *в*). Контуры этих кривых наполнений совпадают с границами заштрихованных площадей. Суммированием абсцисс частных кривых получаются абсциссы общей кривой обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы  $x$  второго года, которая затем делится на частные. Далее, для каждой ступени выделенных наполнений в конце фазы  $x$  отбираются участки на кривых обеспеченности стока фазы  $x$  и находятся средневзвешенные их величины. Например, для наполнения в конце фазы  $x$ , равного полной емкости водохранилища  $V=260$  млн.  $m^3$ , по графику имеем средние ординаты участков частных кривых обеспеченности стока, определивших заполнение всей емкости, и их вес (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Обозначение веса частных кривых наполнений в конце фазы $y$ — начале фазы $x$ . . . . .	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
Вес . . . . .	0,22	0,18	0,21	0,39
Обозначение веса участков на частных кривых обеспеченности стока фазы $x$ , обусловивших наполнение $V=260$ . . . . .	$n_1^{(1)}$	$n_2^{(1)}$	$n_3^{(1)}$	$n_4^{(1)}$
Вес . . . . .	0,15	0,09	0,06	0,09
Обозначение средних ординат участков на частных кривых обеспеченности стока фазы $x$ . . . . .	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	$x_3^{(1)}$	$x_4^{(1)}$
Средние ординаты участков, млн. $m^3$ . . . . .	245	290	360	425

Средневзвешенная ордината стока фазы  $x$ , обусловившая заполнение той или иной емкости водохранилища в конце этой фазы, может быть найдена по выражению

$$x^{(1)} = \frac{x_1^{(1)} n_1^{(1)} + x_2^{(1)} n_2^{(1)} + \dots}{n_1^{(1)} + n_2^{(1)} + \dots} \quad (4.8)$$

В выражении (4.8) нижними индексами обозначены номера частных кривых начальных наполнений фазы  $x$ , верхними — какому конечному наполнению той же фазы  $x$  отвечают средние по участкам и средневзвешенная ординаты стока. Для рассматриваемого наполнения водохранилища 260 млн. м<sup>3</sup> средневзвешенная ордината стока фазы  $x$  определилась равной 315 млн. м<sup>3</sup>.

Аналогичным отбором участков частных кривых обеспеченности стока фазы  $x$  и расчетом по зависимости (4.8) найдены величины средневзвешенного стока для остальных ординат наполнений водохранилища в конце фазы  $x$ . Результаты этого расчета приведены в табл. 6.8.

В этой же таблице приведены и средние величины частного стока за фазу  $y$ , вычисленные по уравнению регрессии (1.8) при найденных значениях средневзвешенных ординат за фазу  $x$ , а также величины коэффициентов  $C_v$  для фазы  $y$ .

Таблица 6.8

Частные кривые конечных наполнений фазы $x$	1	2	3	4	5	6
Частные наполнения водохранилища, млн. м <sup>3</sup>	260	223	148	72	15	0
Вес . . . . .	0,39	0,20	0,20	0,16	0,03	0,02
Средневзвешенные ординаты стока фазы $x$ млн. м <sup>3</sup> . . . . .	315	149	115	72	12	2
Средние ординаты стока фазы $y$ млн. м <sup>3</sup> . . . . .	21,9	15,2	13,9	12,2	9,8	9,3
$C_v$ для фазы $y$ . . . . .	0,28	0,40	0,44	0,50	0,62	0,65

По найденным величинам стока за фазу  $y$ ,  $C_v$  и при  $C_s = 2C_v$  строятся кривые обеспеченности стока в пределах принятых ступеней начальных наполнений водохранилища (количеством 6) и на них проводится расчет частных кривых наполнений в конце этой фазы.

Дальнейший расчет в следующем третьем году, а затем в четвертом, пятом и других годах производится в той же последовательности, как и во втором году. Как обычно, расчет продолжается до получения стабилизировавшихся кривых обеспеченности наполнений водохранилища в фазу  $x$  и фазу  $y$  (рис. 4.8).

По обеспеченности нулевой ординаты наполнений водохранилища за маловодную фазу ( $y$ ) судят об обеспеченности, с которой гарантируется заданная отдача. Если полученное значение обеспеченности (в нашем примере  $p=96\%$ , см. рис. 4.8 б) не отвечает условиям задачи, расчет повторяется при измененной емкости или отдаче.

Для полноты изложения отметим, что расчет частных кривых наполнений водохранилища можно вести, не приводя предварительно кривые обеспеченности стока к весу частных кривых на-

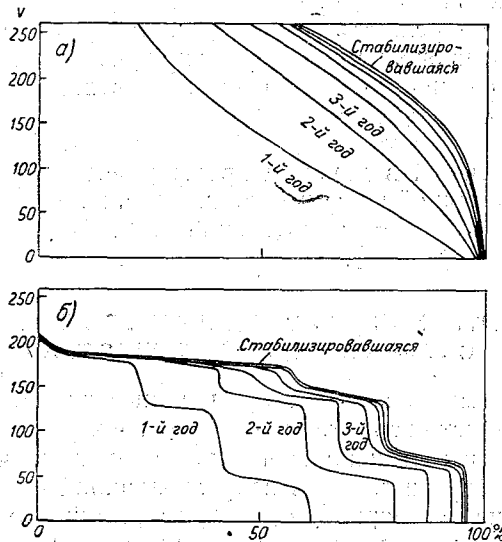


Рис. 4.8. Кривые обеспеченности наполнений водохранилища в конце различных лет расчета за фазу  $x$  (а) и фазу  $y$  (б).

чальных наполнений. Тогда построения ведутся на кривых с основаниями, равными единице, а вес оснований частных кривых наполнений учитывается в абсциссах кривых конечных наполнений водохранилища (см. § 2 настоящей главы). В этом случае в выражение (4.8) для определения средневзвешенных величин стока фазы  $x$ , определивших то или иное наполнение водохранилища, нужно ввести вес каждой частной кривой начальных наполнений  $n_1, n_2, \dots$

$$x^{(1)} = \frac{x_1^{(1)} n_1^{(1)} n_1 + x_2^{(1)} n_2^{(1)} n_2 + \dots}{n_1^{(1)} n_1 + n_2^{(1)} n_2 + \dots} \quad (4.8)$$

При учете коррелятивной связи не только между стоком маловодной фазы  $y$  и предшествующей ей многоводной фазы  $x$ , но

и между стоком многоводной фазы  $x$  и предшествующей ей мало-водной фазы  $y$  расчет ведется по откорректированным по уравнению регрессии (подобному 1.8) кривым обеспеченности стока также и за фазу  $x$ . Учет второй коррелятивной связи осуществляется путем аналогичного изложенному отбору с кривых обеспеченности стока за фазу  $y$  соответствующих участков, обеспечивших то или иное наполнение водохранилища в конце фазы  $y$ , и расчета средневзвешенных величин стока за эту же фазу по уравнению (4.8) или (4'.8).

Нужно иметь в виду, что в отдельных случаях даже при наличии тесной коррелятивной связи ею можно пренебречь, если сток одной из фаз очень мал по сравнению со стоком другой фазы. В подобных условиях неучет связи не приведет к каким-либо существенным погрешностям.

Доказательством отмеченного положения может служить пример, рассмотренный в данном и предыдущем параграфах, когда обеспеченность одной и той же гарантированной отдачи без учета коррелятивной связи (§ 2) составила 97%, а при учете коррелятивной связи (§ 3) — 96%.

#### **§ 4. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ПЕРЕМЕННУЮ ОТДАЧУ С РАЗЛИЧНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ**

До сих пор мы рассматривали задачи регулирования при одной обеспеченности гарантированной отдачи.

При комплексном использовании нередко случаи, когда отдельные потребители требуют воду с различной обеспеченностью. Водоснабжение и энергетика, например, обычно предъявляют более высокие требования к обеспеченности, чем, скажем, ирригация или в некоторых случаях водный транспорт (см. гл. 2).

Задачи многолетнего регулирования при нескольких потребителях с различной обеспеченностью гарантированной отдачи могут быть решены с помощью уже знакомого нам метода Саваренского — Крицкого — Менкеля. При этом, чтобы задача стала определенной, необходимо отдачу поставить в зависимость от какого-либо фактора, т. е. разработать и принять диспетчерские правила работы водохранилища с переменной за многолетний период отдачей. Практически очень удобно отдачу ставить в зависимость от наполнения водохранилища.

Расчет ведется путем последовательного построения кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища. При этом, если решается задача только в отношении многолетней составляющей емкости водохранилища, то расчет, как обычно, осуществляется по годовым величинам стока; при решении же задачи в отношении всей емкости (включая и сезонную составляющую) расчет осуществляется по величинам стока за характерные фазы.

Бвиду большого количества взаимно влияющих друг на друга факторов рассматриваемую задачу приходится решать кропотливым подбором. Одни элементы регулирования предварительно жестко закрепляются, другие — получаются как результат расчета.

Пусть в комплекс входит три потребителя. Наиболее ответственный из них требует воду в размере  $v$  обеспеченностью 97%, второй — в размере  $b$  обеспеченностью 90% и третий — в размере  $a$  обеспеченностью 75%. В таком случае график обеспеченности гарантированной отдачи примет ступенчатый вид (рис. 5.8 а)

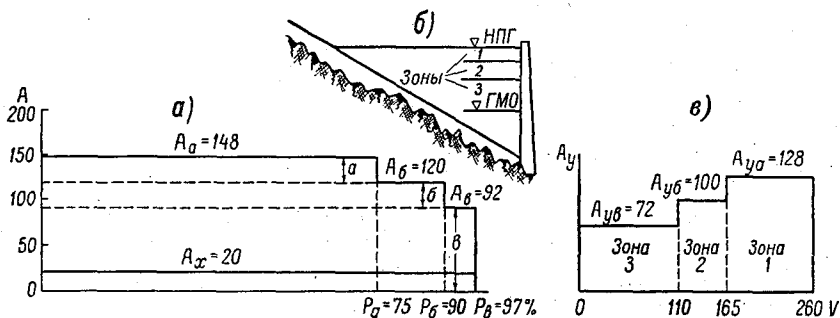


Рис. 5.8. График обеспеченности гарантированной отдачи (а), схема разбивки емкости водохранилища на диспетчерские зоны (б) и диспетчерская схема водоотдачи (в).

с ординатами:  $v$ ,  $v+b$  и  $v+b+a$  при соответственных значениях обеспеченности 97, 90 и 75%.

В соответствии с этим графиком полезная емкость водохранилища делится на зоны, наличие запасов воды в которых определяет водоподачу тем или иным потребителям. На рис. 5.8 б показано разделение емкости на зоны. При запасах воды в пределах верхней зоны 1 обеспечивается водоподача всем трем потребителям —  $v+b+a$ , при запасах воды в пределах средней зоны 2 — двум потребителям —  $v+b$  и в пределах нижней зоны 3 — только наиболее ответственному потребителю —  $v$  (с обеспеченностью 97%). Таким образом, по мере истощения запасов воды водохранилища постепенно один за другим будут отключаться водопотребители, за исключением водопотребителя  $v$  с самой высокой обеспеченностью, водоподача которому не прекращается до полного исчерпания запасов воды.

Разбивку емкости на зоны производят с таким расчетом, чтобы в процессе длительной эксплуатации водохранилища подача воды тому или иному потребителю осуществлялась с требуемой обеспеченностью — 75, 90 или 97%.

Принятое разделение емкости на зоны закрепляется диспетчерской схемой (рис. 5.8 в), которая и берется в основу расчета. Первоначально диспетчерская схема водоподдачи строится приближенно, основываясь на общих соображениях, и в процессе расчета уточняется.

Построение кривых обеспеченности наполнений водохранилища производится до их стабилизации. Расчет будет считаться законченным, если график обеспеченности отдачи, диспетчерская схема и стабилизовавшиеся кривые будут взаимно согласовываться. Эта согласованность заключается в том, что на стабилизовавшихся кривых обеспеченности пограничным наполнениям по диспетчерской схеме, разделяющей зоны 1 и 2 или 2 и 3, должны отвечать соответствующие обеспеченности по графику отдачи (рис. 5.8 а) — 75 или 90%. Нулевому же наполнению на кривой обеспеченности наполнений водохранилища за маловодную фазу должна отвечать наибольшая обеспеченность по графику отдачи — в нашем примере 97%.

При несогласованности полученных результатов (стабилизовавшихся кривых обеспеченности наполнений водохранилища) с предварительно заданными условиями (графиком обеспеченности отдачи и диспетчерской схемой) расчет повторяется при соответственно измененных условиях.

Если расчет ведется по фазам и все потребители пользуются водой круглогодично, диспетчерские схемы строятся по числу рассматриваемых фаз. В отдельных случаях возможно, что только один потребитель использует воду круглогодично, например при бытовом и промышленном водоснабжении, а остальные — в маловодную фазу, что может иметь место при сельскохозяйственном орошении и др. Тогда окажется достаточным построить только одну диспетчерскую схему для маловодной фазы.

Проследим на конкретном примере последовательность расчета многолетнего регулирования при отдачах с различной обеспеченностью.

Заданы:

- 1) график водопотребления с тремя ступенями гарантированной отдачи  $p_a = 75\%$ ;  $p_b = 90\%$  и  $p_s = 97\%$ ;
- 2) полезная емкость водохранилища  $V = 260$  млн.  $m^3$ ;
- 3) гидрологические характеристики водотока.

Фаза	Объем стока, млн. $m^3$	Коэффициенты	
		$C_v$	$C_s$
Половодная . . . . .	193	0,80	1,60
Меженная . . . . .	17	0,50	1,00



Требуется найти величины отдачи для указанных трех ступеней.

Статистические параметры стока за расчетные фазы приведены на стр. 304.

Межфазовая коррелятивная связь не учитывается в расчетах.

Расчет начинается с назначения высоты ступенек графика обеспеченности отдачи (рис. 5.8 а) и пограничных наполнений водохранилища на диспетчерской схеме (рис. 5.8 б).

В рассматриваемом конкретном примере водоподача всем трем потребителям намечена только в фазу  $y$  (меженную). В фазу  $x$  (половодную) будет снабжаться водой лишь потребитель с наиболее высоким процентом обеспеченности  $p_a$ . Ввиду этого потребовалось составить только одну диспетчерскую схему, регламентирующую использование воды в фазу  $y$ .

В начале расчета графику обеспеченности отдачи и диспетчерской схеме задаются более или менее произвольные очертания в смысле соотношений между величинами отдачи и разделения общей полезной емкости на зоны, при заполнении которых будет обеспечиваться та или иная отдача.

В одном из расчетных вариантов для трех рассматриваемых градаций обеспеченности приняты следующие величины суммарных отдач (ординаты графика обеспеченности отдачи — рис. 5.8 а).

Фаза	Отдача в млн. $m^3$ при обеспеченности		
	$p_a = 75\%$	$p_b = 90\%$	$p_a = 97\%$
Половодная $x$ . . .	20	20	20
Меженная $y$ . . . . .	128	100	72
Год . . . . .	148	120	92

Полезная емкость водохранилища, равная  $V=260$  млн.  $m^3$ , соответственно трем ступеням гарантированной отдачи разбита на три диспетчерские зоны (рис. 5.8 б).

Зона	Наполнение, млн. $m^3$
Верхняя (1) . . . . .	260—165
Средняя (2) . . . . .	165—110
Нижняя (3) . . . . .	110—0

При наполнении водохранилища к началу фазы  $y$  в пределах верхней зоны (1) вода в фазу  $y$  подается всем трем потребителям в размере 128 млн.  $m^3$  (ступень  $p_a$  за вычетом отдачи в фазу

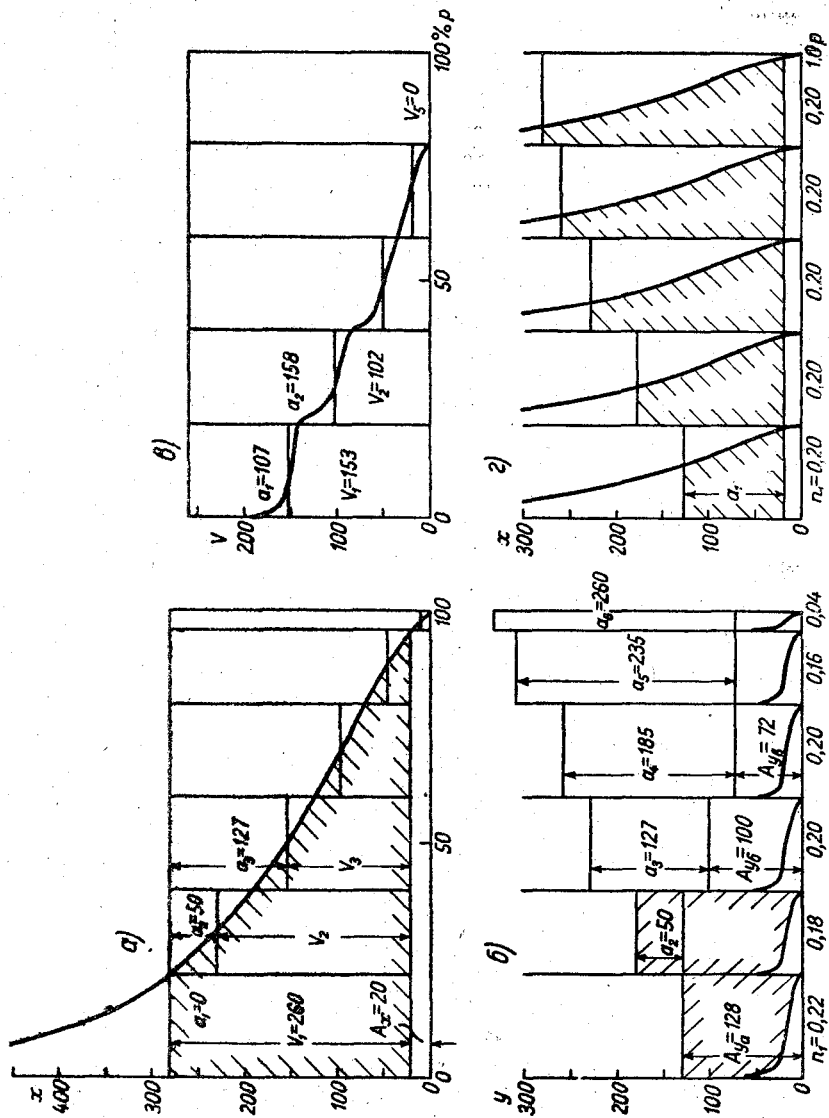


Рис. 6.8. Схема расчета на переменную отдачу с различной обеспеченностью.

$x$ ), при наполнении в пределах средней зоны (2) — двум потребителям в размере 100 млн.  $m^3$  и при наполнении водохранилища в пределах нижней зоны (3) — одному потребителю в размере 72 млн.  $m^3$ . В первую же фазу  $x$ , согласно условиям задачи, во всех случаях подается вода в размере потребности (20 млн.  $m^3$ ) наиболее ответственного потребителя с высокой обеспеченностью  $p_0$ .

Построение кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища начато с многоводной фазы.

При неучете коррелятивной связи стока за смежные фазы расчет сводится к следующим построениям.

Строится теоретическая кривая обеспеченности стока за фазу  $x$  (рис. 6.8 а). Принимая в начале расчета водохранилище опорожненным и вычитая из стока за фазу  $x$  величину отдачи, получим (над линией отдачи) избытки стока над потреблением, которые в пределах свободной емкости водохранилища реализуются на ее заполнение.

В результате проведенного построения получена кривая распределения вероятностей наполнений водохранилища к концу фазы  $x$  (рис. 6.8 а).

Чтобы построить кривую обеспеченности наполнений водохранилища к концу фазы  $y$ , необходимо конечные наполнения за фазу  $x$  или начальные наполнения за фазу  $y$ , представленные в виде кривой обеспеченности, сложить с разностями сток — отдача за фазу  $y$ . Для этого, как обычно, от общей кривой обеспеченности конечных — начальных наполнений следует перейти к частным кривым путем замены общей плавной кривой ступенчатой (рис. 6.8 а), каждая ступенька которой с шириной основания  $n_i$  ( $\sum n_i = 1$ ) может рассматриваться как частная кривая обеспеченности начальных наполнений за фазу  $y$ . Последние и должны суммироваться с разностями сток — отдача за фазу  $y$ . При этом, в отличие от задач, решавшихся в § 2 и 3 настоящей главы, отдача в фазу  $y$  назначается по диспетчерской схеме (см. рис. 5.8 в) в соответствии с начальным наполнением водохранилища в размерах 128, 100 или 72 млн.  $m^3$ .

В итоге будут получены частные кривые обеспеченности конечных наполнений водохранилища за фазу  $y$  (рис. 6.8 б), суммированием абсцисс которых получается общая кривая обеспеченности конечных наполнений за эту же фазу  $y$  (рис. 6.8 в). Этим завершается расчет за первый год регулирования.

Дальнейший расчет за второй год, а также за все последующие годы вплоть до получения стабилизировавшихся кривых выполняется аналогичным путем — общие кривые конечных наполнений за фазу  $y$  или начальных за фазу  $x$  заменяются частными, которые суммируются с разностями сток — отдача за фазу  $x$  (рис. 6.8 г). По частным кривым конечных наполнений за фазу  $x$  строятся общие кривые и т. д.

При заданных исходных данных и предварительно назначенных графике обеспеченности отдачи и диспетчерской схеме расчеты доведены до стабилизации кривых обеспеченности наполнений водохранилища за фазы  $x$  и  $y$  (рис. 7.8).

Как видно на рисунке, расчетным обеспеченностям на стабилизировавшихся кривых отвечают наполнения водохранилища:

	По кривой фазы $x$		По кривой фазы $y$
Обеспеченность, %	75	90	97
Наполнение, млн. $m^3$	165	110	0

Эти наполнения водохранилища соответствуют диспетчерской схеме (см. рис. 5.8 *в*) и, следовательно, задача решена правильно. Правильное решение достигнуто не сразу, а путем кро-

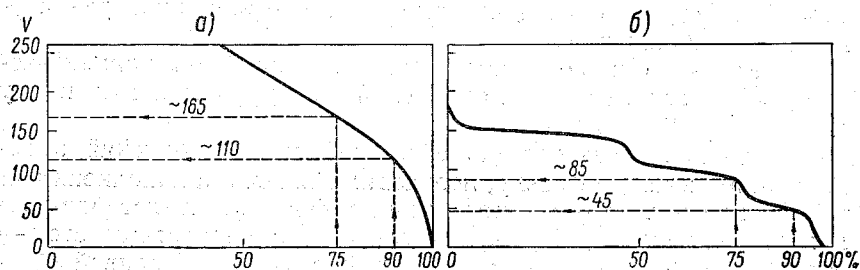


Рис. 7.8. Схема проверки соответствия стабилизировавшихся кривых обеспеченности наполнений водохранилища графику обеспеченности отдачи и диспетчерской схеме.

потливого расчета в результате нескольких попыток, при которых изменялся как график отдачи (см. рис. 5.8 *а*), так и диспетчерская схема.

При отсутствии указанного соответствия расчет необходимо повторить при измененных начальных условиях — измененных величинах отдачи или пограничных наполнений на диспетчерской схеме или, наконец, при измененных обоих условиях.

Практически, однако, несоответствие может быть обнаружено на промежуточных этапах расчета, т. е. ранее достижения стабилизировавшихся кривых, и необходимые уточнения в исходные условия вносятся по ходу расчета, что существенно сокращает объем работы.

Помимо ответа на вопросы, связанные с непосредственным решением задачи многолетнего регулирования на переменную отдачу с различной обеспеченностью, результаты проведенного расчета одновременно дают возможность разделить многолетнюю емкость на части, необходимые для выделения подзон

в зоне гарантированной отдачи на подробном диспетчерском графике управления работой водохранилища (см. гл. 7, § 5). Это разделение емкости производится на основе данных стабилизированной кривой обеспеченности наполнений водохранилища за маловодную фазу, как раз характеризующую предполовонные наполнения, т. е. наполнения в пределах многолетней составляющей емкости. Для рассмотренного выше примера (рис. 7.8 б) обеспеченности 75% отвечает наполнение 85 млн. м<sup>3</sup> и 90% — 45 млн. м<sup>3</sup>, вся же многолетняя емкость равна 140 млн. м<sup>3</sup> (при полной полезной емкости 260 млн. м<sup>3</sup>). Из этого вытекает, что верхняя подзона зоны гарантированной отдачи (1 а, рис. 3.7 в), регламентирующая подачу воды с обеспеченностью 75%, заключена в пределах от 140 до 85 млн. м<sup>3</sup> (величина  $bb'$ ), средняя (1 б), регламентирующая подачу воды с обеспеченностью 90%, — от 85 до 45 млн. м<sup>3</sup> (величина  $b'b''$ ) и нижняя (1 в), регламентирующая подачу воды с обеспеченностью 97%, — от 45 млн. м<sup>3</sup> до 0 (величина  $b''h$  по рис. 3.7 в).

Потери воды при расчетах регулирования методом построения кривых обеспеченности наполнений водохранилища можно учитывать в процессе расчета и назначать график обеспеченности отдачи по величинам нетто. При построении же кривых распределения вероятностей наполнений водохранилища в расчет вводится отдача брутто, получаемая прибавлением к отдаче нетто соответствующих потерь. В таком случае потери воды исчисляются исходя из среднего наполнения водохранилища за фазу, получаемого как среднее из начального (заданного предыдущим расчетом) и среднего конечного наполнения (оцениваемого приближенно, а затем уточняемого повторным расчетом). По среднему наполнению находится горизонт, а по нему площадь зеркала водохранилища. По площади зеркала и высоте слоя потерь на испарение и фильтрацию находятся соответственные потери из водохранилища. При таком способе учета потерь в итоге расчета получается отдача нетто.

Можно расчет выполнять и по отдаче брутто, как сделано в рассмотренных выше примерах, а потери учесть в результативных данных, исходя из средних наполнений водохранилища, установленных на основе опыта проектирования и указанных выше. Отдачу нетто можно определить также путем расчета, аналогичного рассмотренному в гл. 6, § 8.

Расчеты регулирования стока на переменную отдачу с различной обеспеченностью можно произвести также и по календарному гидрологическому ряду путем балансирования объемов воды за критический период сработки водохранилища. А именно, определив по наиболее маловодному периоду длительностью  $T$  величину зарегулированного расхода  $Q$  по заданной емкости  $V$  (гл. 5, § 5), распределяют объем зарегулированного стока  $QT$  в соответствии с графиком обеспеченности гарантированной от-

дачи, подобно изображенному на рис. 5.8 а. При этом, если длительность критического периода сработки водохранилища меньше числа лет, в течение которых не будет подаваться вода тем или иным потребителям, при балансировании такие ступени отдачи должны исключаться. Например, при трех ступенях гарантированной отдачи  $A_a$ ,  $A_b$  и  $A_c$  с обеспеченностью  $p_a=75\%$ ,  $p_b=90\%$  и  $p_c=97\%$  и длительности гидрологического ряда 60 лет число лет, в которые та или иная отдача не будет выдерживаться, составит  $t_a=15$ ,  $t_b=6$  и  $t_c=2$ . Следовательно, при критической длительности периода  $n+t_m$  (см. гл. 6, § 8), предположим, равной 8,6 лет, балансированию подлежат отдачи  $A_b$  и  $A_c$ , а также урезанная отдача (см. гл. 7) за пределами расчетной обеспеченности.

Если величины рассматриваемых двух ступеней гарантированной отдачи заданы условиями решаемой водохозяйственной задачи, искомой будет урезанная отдача  $Q_y$ . Тогда в соответствии с (24.5) и с рис. 5.8 а ее значение может быть найдено по выражению

$$Q_y = \frac{QT - [Q_b(T - t_b) - Q_c(t_b - t_c)]}{t_c}. \quad (5.8)$$

Здесь  $Q_b$  и  $Q_c$  — величины средних годовых расходов отдачи, соответствующих объемам отдачи  $A_b$  и  $A_c$ . Если длительность критического периода сработки водохранилища превышает длительность периода, в течение которого не подается вода по наибольшему значению гарантированной отдачи  $A_a$ , в выражение (5.8) в качестве вычитаемого нужно добавить еще один член —  $Q_a(T - t_a)$ , а член  $Q_b(T - t_b)$  написать в виде  $Q_b(t_a - t_b)$ . При несоответствии полученного значения урезанной отдачи  $Q_y$  заданным условиям допустимого ее снижения необходимо изменить гарантированную отдачу (одну или несколько ступеней) и расчет повторить.

Далее проводятся расчеты регулирования по всему календарному гидрологическому ряду. Результаты этих расчетов должны согласоваться с принятыми условиями поддержания отдачи при требуемых обеспеченностях.

## § 5. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ПЕРЕМЕННЫЕ ОРОСИТЕЛЬНЫЕ НОРМЫ

При рассмотрении требований к водным ресурсам со стороны орошения (гл. 2, § 2) было отмечено, что в районах, где атмосферные осадки влияют на увлажнение почвы, оросительные нормы не остаются постоянными и меняются в зависимости

от засушливости года. При этом в северных районах зоны неустойчивого увлажнения, например в Курской, Московской и других областях, естественное увлажнение почв по годам колеблется в широких пределах, а отсюда в широких пределах изменяются и оросительные нормы.

Наличие зависимости оросительных норм от климатических условий, очевидно, должно найти отражение при оценке оросительной способности источника и размеров потребной для регулирования стока полезной емкости водохранилища. Неучет же этой зависимости и ориентирование на наибольшую оросительную норму, что справедливо для засушливых районов, приведет к преуменьшению оросительной способности источника и к преувеличению полезной емкости водохранилища. При этом ошибка будет тем значительнее, чем более резкие колебания испытывают оросительные нормы.

Упрощенный способ расчета полезной емкости водохранилища при переменных оросительных нормах разработан проектной организацией Нижволгопроект (примерно в 1932—1935 гг.). Он основан на схеме, которая в 1930 г. С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем была применена к расчетам многолетнего регулирования стока.

Обозначая, как обычно, модульные коэффициенты годового стока через  $K$  и коэффициент регулирования (отдачи) через  $\alpha$  и имея в виду, что в рассматриваемом случае не только  $K$ , но и  $\alpha$  есть величины переменные, подчиняющиеся закону распределения вероятностей, можем определить величину годового дефицита стока заданной обеспеченности  $p$ , как

$$Z_p = \alpha_{p'} - K_p. \quad (6.8)$$

Очевидно, в данном случае величина  $K$  должна отвечать на кривой обеспеченности стока заданной обеспеченности  $p$ , а величина  $\alpha$  на кривой обеспеченности отдачи в запас расчета  $p' = 100 - p$ . Подобным же образом могут быть найдены дефициты стока за два, за три и т. д. рядом стоящих маловодных года и максимальный дефицит стока  $Z_{p \text{ макс}}$ , которым определится многолетняя составляющая емкости водохранилища, и критический период ее сработки  $n$  (см. гл. 6).

Рассмотренный выше упрощенный способ расчета страдает рядом недостатков, одним из которых и наиболее существенным, по мнению М. В. Потапова [6], является то, что это «решение исходит из неявного предположения об отсутствии какой-либо связи между годовым стоком и годовой оросительной нормой и не дает возможности учесть эту связь, если она имеется». Поэтому им предложено более точное решение задачи. Оно сводится к отысканию распределения вероятностей функции двух переменных величин по заданным кривым распределения вероят-

ностей для каждой из них. С подобного рода задачей мы уже встречались при расчетах регулирования по фазам годового цикла (§ 3 настоящей главы).

Пусть будут заданы две кривые обеспеченности годовых величин стока  $K$  и годовой отдачи  $\alpha$ . Требуется получить кривую обеспеченности дефицитов стока  $Z=f(K, \alpha)$ . Для удобства рассуждений обозначим первую переменную ( $K$ ) через  $x$ , а вторую ( $\alpha$ ) — через  $y$ . При наличии коррелятивной связи между двумя переменными  $x$  и  $y$ , характеризующей коэффициентом корреляции  $r$ , каждому значению  $x$ , как известно, будет соответствовать множество значений  $y$ . В этом случае, как было показано в § 3, среднее (наиболее вероятное) значение переменной  $y$  при заданном значении переменной  $x$  может быть определено по уравнению регрессии (1.8), а коэффициент изменчивости  $C_y$  — в соответствии с уравнениями (2.8) и (3.8).

Схема графического расчета сводится к следующему. На координатные оси нанесем квадрат со сторонами, равными единице (рис. 8.8). На одной стороне квадрата<sup>1</sup>, как на оси абсцисс, построим кривую обеспеченности величин  $x$ , а на другой непараллельной ей — серию частных кривых обеспеченности  $y$  для серии средних ординат участков кривой  $x$  с равными основаниями  $n=1/s$  (где  $s$  — число участков, на которые она разбита). В нашем примере кривая  $x$  разбита на 10 участков; соответственно этому получено 10 частных кривых обеспеченности  $y$  (на рис. 8.8 разбивка кривой  $x$  на участки не показана). Далее, в этом квадрате наносим линии равных значений функции  $Z$ . Точки этих линий могут быть получены следующим путем. Для заданных значений  $x_1, x_2, \dots$  вычисляем соответственные значения  $y_1, y_2, \dots$ , удовлетворяющие уравнению  $Z=f(x, y)$ , и отыскиваем абсциссы  $p_{y_1}, p_{y_2}, \dots$  на тех кривых  $y$ , которые соответствуют выбранным значениям  $x_1, x_2, \dots$ . Точки линии  $Z$  получаются на пересечении горизонтальных прямых, проходящих через абсциссы  $p_{y_1}, p_{y_2}, \dots$ , и вертикальных прямых, проходящих через соответственные абсциссы  $p_{x_1}, p_{x_2}, \dots$ . Величиной площади, отсекаемой линией  $Z$  на квадрате вероятностей по отношению к площади всего квадрата (равном единице), определится обеспеченность рассматриваемого дефицита  $Z$ . Таким же образом строятся линии при других значениях  $Z$  и определяются отвечающие им обеспеченности.

Для лучшего уяснения последовательности расчета в дальнейшем будем исходить из конкретного примера, интерпретированного упомянутым рис. 8.8.

Изменчивость стока характеризуется  $C_v=0,50$  и  $C_s=1,0$ . Оро-

<sup>1</sup> Указанный квадрат носит наименование квадрата вероятностей.



сительная норма  $m$  связана со стоком  $K$  коррелятивной зависимостью

$$m = 6000 - 2000K. \quad (7.8)$$

Коэффициент корреляции между  $m$  и  $K$  принят  $r = -0,60$ . Средний многолетний коэффициент регулирования стока  $\alpha_0 = 0,80$ . При  $K=1$  из формулы (7.8) получаем среднюю оросительную норму

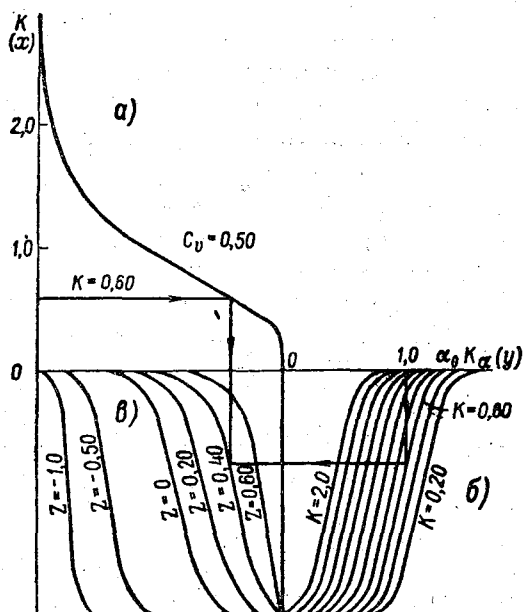


Рис. 8.8. Расчет обеспеченности дефицита стока при регулировании на переменные оросительные нормы.

тельную норму, или норму потребления  $\bar{m} = 4000 \text{ м}^3/\text{га}$ . Тогда средние модульные коэффициенты потребления составят ряд

$$K_{\alpha_{\text{ср}}} = 1,5 - 0,5K. \quad (8.8)$$

В соответствии с предпосылками, приведенными в работе [6]. Потапов устанавливает коэффициент изменчивости  $K_{\alpha}$  равным  $C_{v_{\alpha}} = 0,20$  и принимает  $C_{s_{\alpha}} = 0,40$ .

Далее, задавшись различными (частными) значениями  $K$  (из рис. 8.8 а), по формуле (8.8) подсчитываем соответственные (частные) значения  $K_{\alpha_{\text{ср}}}$ , умножая которые на  $\alpha_0 = 0,80$ , получаем средние частные величины потребления  $\alpha_0 K_{\alpha_{\text{ср}}}$  для каждого рассматриваемого частного значения стока  $K$ . Коэффи-

циенты изменчивости частного потребления определяем из выражения

$$C_{v\alpha}^K = \frac{0,20}{K_{\alpha_{\text{ср}}}} \quad (9.8)$$

Нетрудно заметить, что величины  $\alpha_0 K_{\alpha_{\text{ср}}}$  идентичны величинам  $y$  в формуле (1.8), а  $C_{v\alpha}^K$  — величинам  $C_v^K$  в формуле (3.8).

Было задано 10 значений величин  $K$  — от 0,20 до 2,0 через интервал 0,20; соответственно получено 10 величин  $\alpha_0 K_{\alpha_{\text{ср}}}$ , которые заключены в диапазоне от 1,12 до 0,40, и 10 значений  $C_{v\alpha}^K$  — от 0,14 до 0,40. По этим данным<sup>1</sup> и построены 10 частных кривых обеспеченности потребления  $\alpha_0 K_{\alpha}$  (рис. 8.8 б). Затем способом, указанным выше, построены линии равных значений дефицитов  $Z = \alpha_0 K_{\alpha} - K$  (рис. 8.8 в). На этом рисунке показан расчет точки на линии  $Z = 0,40$  при заданном  $K = 0,60$  и соответственном значении  $\alpha_0 K_{\alpha} = 1,0$  и определены обеспеченности дефицитов  $Z = -1,0$ ;  $Z = -0,50$ ;  $Z = 0$ ;  $Z = 0,20$ ;  $Z = 0,40$  и  $Z = 0,60$ . Эти обеспеченности оказались равными (в %)

$Z$ . . . . .	-1,0	-0,50	0	0,20	0,40	0,60
$p$ . . . . .	13,3	29,4	55,5	67,8	79,4	89,4

Проведенным расчетом определены обеспеченности однодичных дефицитов стока, что не дает законченного решения задачи. Поэтому для ее завершения требуется рассмотреть также дефициты стока за двухлетия, трехлетия и т. д., как это предусмотрено схемой расчета по методу Крицкого и Менкеля 1930 г. Этот расчет ведется аналогично изложенному.

#### Литература

1. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Обобщенные приемы регулирования стока на основе математической статистики. Гидротехническое строительство, № 2, 1940.
2. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеоиздат, Л., 1952.
3. Никитин С. Н. Методика водноэнергетических расчетов. Госэнергоиздат, М., 1949.
4. Потапов М. В. Приложение теории вероятностей к расчетам стока. Сочинения, т. III, Сельхозгиз, М., 1951.
5. Алексеев Г. А. Метод определения коррелятивных зависимостей и его применение для вероятностного прогноза и расчета сезонного стока. Труды ГГИ, вып. 31, (85), 1951.
6. Потапов М. В. К вопросу о расчете регулирования стока на переменные оросительные нормы. Сочинения, т. III, Сельхозгиз, М., 1951.

<sup>1</sup> Для упрощения расчетов коэффициент асимметрии принят одинаковым и равным 0,50.

## ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

### ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

#### § 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Водноэнергетическая установка использует механическую работу (энергию) потока, производимую при падении воды из верхнего бьефа в нижний, и преобразует ее в электрическую энергию. Следовательно, чтобы стало возможным использование энергии потока, необходимо в месте постройки гидроэлектрической станции (ГЭС) создать сосредоточенное падение, т. е. образовать разность уровней воды выше и ниже станции — напор  $H$ .

Существует два основных типа ГЭС — приплотинные и деривационные (рис. 1.9). На приплотинных напор создается устройством плотины непосредственно в месте расположения ГЭС. На деривационных плотина устраивается выше по течению, а вода к ГЭС подводится специальным трактом (открытым каналом, тоннелем или трубопроводом). В первом типе ГЭС перепад создается только подпором естественных уровней водотока плотиной, во втором — частично плотиной и частично падением самой реки, в обход которого устраивается водоподводящий тракт.

Вода, падая с высоты верхнего бьефа и пройдя через турбину, будет производить механическую работу, равную  $\gamma QH$  кгм/сек, где  $\gamma$  — вес  $1 \text{ м}^3$  воды в килограммах.

Техническими единицами мощности, т. е. работы, совершаемой в единицу времени, являются:

$$1 \text{ л. с.} = 75 \text{ кгм/сек},$$

$$1 \text{ квт} = 102 \text{ кгм/сек}.$$

Таким образом, мощность, развиваемая  $Q \text{ м}^3/\text{сек}$  воды, падающей с высоты  $H \text{ м}$ , составит

$$N_0 = \frac{\gamma QH}{75} \text{ л. с.} = \frac{\gamma QH}{102} \text{ квт},$$

или, так как  $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,

$$N_0 = 13,33QH \text{ л. с.} = 9,81QH \text{ квт}.$$

Вследствие наличия гидравлических и механических потерь напора в турбине отдаваемая на валу турбины мощность будет меньше теоретической. Потери мощности в турбине учитываются коэффициентом полезного действия  $\eta_T$ . Тогда выражение мощности на валу турбины запишется так:

$$N_T = 9,81QH\eta_T \text{ квт.}$$

Механическая мощность турбины преобразуется в электрическую при помощи генератора, который соединен с турбиной. В самом генераторе также имеют место потери мощности, оце-

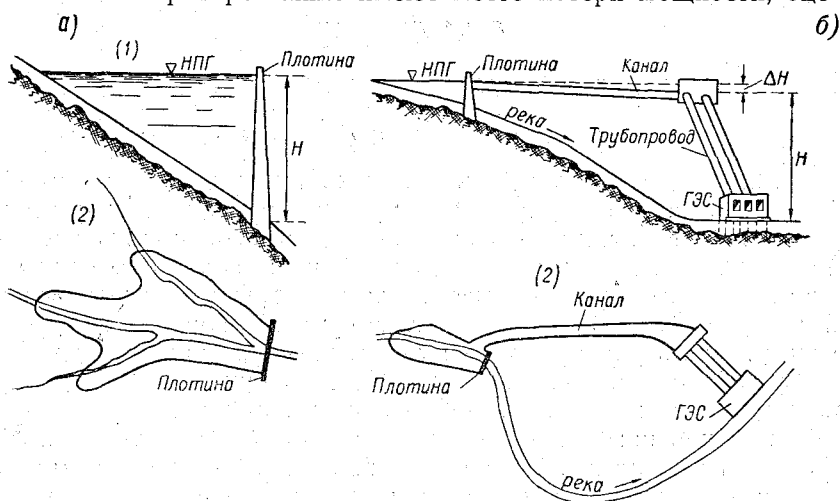


Рис. 1.9. Схема приплотинной (а) и деривационной ГЭС (б).

1 — продольный профиль, 2 — план.

ниваемые коэффициентом полезного действия генератора  $\eta_G$ . В таком случае мощность ГЭС, отдаваемая с шин генератора<sup>1</sup>, будет равна

$$N = 9,81QH\eta_T\eta_G \text{ квт.} \quad (1.9)$$

На современных крупных гидроэлектростанциях коэффициенты полезного действия агрегатов высоки и колеблются в диапазоне: для турбин  $\eta_T = 0,85 - 0,95$ , для генераторов  $\eta_G = 0,96 - 0,98$ .

На гидроэлектростанциях небольшой мощности, оборудованных иногда турбинами кустарного производства, коэффициенты полезного действия агрегатов значительно ниже указанных для крупных ГЭС.

<sup>1</sup> Если генератор насажен не на общий вал с турбиной, что имеет место в некоторых старых гидроэлектростанциях, при передаче мощности от турбины к генератору получают дополнительные потери, учитываемые соответствующим коэффициентом  $\eta_{п}$ .

В процессе эксплуатации на одной и той же турбине коэффициенты полезного действия не остаются постоянными и меняются в зависимости от изменения нагрузки, т. е. от развиваемой ею мощности, и от действующего напора. Коэффициенты полезного действия генераторов более устойчивы; они мало меняются при изменении нагрузки.

Соответственно оборудованию и режиму работы каждой ГЭС свойственен свой средневзвешенный коэффициент полезного действия. Если принять во внимание последнее, то можно определить коэффициент в формуле мощности, отвечающий каким-то средним условиям работы ГЭС. Например, при среднем  $\eta_r = 0,90$  и  $\eta_g = 0,97$  коэффициент в формуле мощности составит 8,6, а при среднем  $\eta_r = 0,85$  и том же значении  $\eta_g = 0,90$  составит 8,1. В этих пределах обычно и находится коэффициент в формуле мощности, используемый при практических расчетах. При этом верхний предел принимается при определении мощностей крупных ГЭС, нижний — средних ГЭС<sup>1</sup>. В итоге можно записать

$$N = (8,1 - 8,6) QH \text{ квт.} \quad (2.9)$$

Для отдельных крупных ГЭС коэффициент в формуле мощности может быть и несколько выше указанного верхнего предела. Например, для Красноярской ГЭС этот коэффициент равен 8,9. (Коэффициенты полезного действия турбины находятся по так называемой универсальной характеристике турбины, о которой будет сказано ниже, в § 6.)

Суммарной характеристикой работы ГЭС за какой-то период является выработка электрической энергии в киловатт-часах. Вырабатываемая энергия определяется из выражения

$$E = \int_0^t N dt \text{ квт-ч,}$$

которое для практических расчетов заменяется

$$E = \sum_0^t N \Delta t \text{ квт-ч,} \quad (3.9)$$

где  $N$  — средняя мощность в интервале  $\Delta t$  в квт;  $\Delta t$  — расчетный интервал времени в часах, на который разбит весь рассматриваемый период  $t$ .

Характерной величиной, определяющей суммарный эффект работы электростанции, является средняя годовая выработка энергии

$$E = \bar{N} \cdot 8766 \text{ квт-ч,} \quad (4.9)$$

<sup>1</sup> Коэффициент в формуле мощности для малых ГЭС составляет 6,0—7,5.

где  $\bar{N}$  — средняя многолетняя мощность в квт; 8766 — среднее число часов за год.

Как следует из формулы (1.9), мощность ГЭС зависит от расхода, напора и коэффициентов полезного действия турбин и генераторов.

Если в расчет ввести средневзвешенные значения коэффициентов полезного действия, мощность ГЭС будет зависеть только от расхода и напора. Величины используемых на ГЭС расходов зависят от режима водотока, характера осуществляемого водохранилищем регулирования и пропускной способности турбин. Напоры же зависят от положения уровней верхнего и нижнего бьефов, а в деривационных установках — и от потерь напора в водоподводящем тракте. Уровень верхнего бьефа определяется наполнением водохранилища и характером зависимости  $V=f(Z)$ , а нижнего бьефа — расходом и характером зависимости  $Q=f(Z)$ , а также подпором от ледовых образований, от ниже лежащей установки или от естественного водоема — озера, моря.

Нахождение уровня верхнего бьефа по наполнению водохранилища, а нижнего бьефа по расходу для периода открытого русла очень просто и пояснений не требует. На вопросе определения уровня нижнего бьефа для зимнего периода следует остановиться более подробно ввиду нарушения связи  $Q=f(Z)$  под влиянием зимних явлений.

Подобно тому, как это имеет место в истоках рек из озер (исток р. Ангары из оз. Байкал, исток р. Свири из Онежского озера, исток р. Невы из Ладожского озера и т. п.), в нижних бьефах гидротехнических сооружений зимой наблюдается полынья. Причинами полыньи являются: поступление в реки из озер или водохранилищ воды с температурой выше нуля и изменение скоростного режима потока по выходе его из озера или водохранилища, с чем также связано дополнительное выделение тепла. За счет содержащегося в потоке тепла и поддерживается полынья, протяженность которой определяется удаленностью от сооружений сечения, где теплоприток и теплоотдача в атмосфере взаимно уравниваются и вода охлаждается до нуля.

Длина полыньи меняется в течение зимы и находится в зависимости от характера изменения температуры воздуха и суровости зимы. С понижением температуры воздуха уменьшается длина полыньи, с повышением — увеличивается. Поэтому обычно в начале и конце зимы длина полыньи больше, в середине — меньше. В суровые зимы полынья короче, чем в теплые.

Для глубоких и малопроточных водохранилищ характерна более высокая зимняя температура воды, чем для неглубоких и проточных водохранилищ. В связи с этим при прочих равных условиях в нижних бьефах гидротехнических сооружений на первых полынья длиннее, чем на вторых.

Несмотря на наличие полыньи зависимость  $Q=f(Z)$  в нижнем бьефе не отвечает летним условиям, так как кромка льда создает подпор зимних уровней, распространяющийся, как правило, до створа сооружений. Этот подпор тем значительнее, чем короче полынья и чем больше стеснено русло у кромки льда шугой и обломками льда от постоянно образующихся и ломающихся заберегов.

Чтобы определить подпор уровней нижнего бьефа за счет ледовых явлений, необходимо знать длину полыньи и степень уменьшения пропускной способности русла у кромки льда, обычно оцениваемую зимним коэффициентом, представляющим

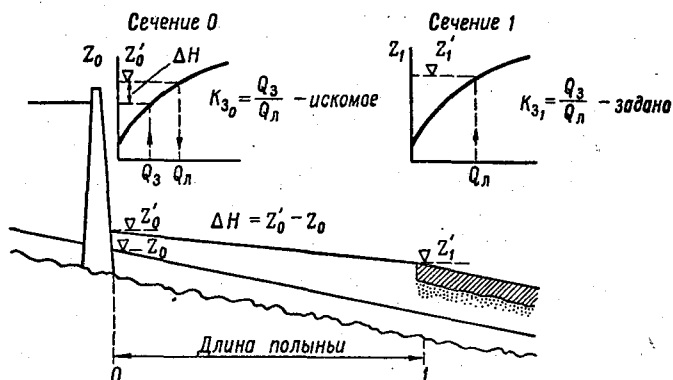


Рис. 2.9. Схема определения  $K_3 = \frac{Q_3}{Q_l}$  в створе ГЭС.

отношение зимнего расхода к летнему при одном и том же уровне  $K_3 = \frac{Q_3}{Q_l}$ . Коэффициент  $K_3$  для кромки льда устанавливается на основе данных измерений зимних расходов в естественных условиях или принимается по аналогии с другими объектами. Коэффициент  $K_3$  для створа сооружений определяется расчетом. Схема этого расчета заключается в следующем (рис. 2.9).

При заданном зимнем расходе  $Q_3$  и известном  $K_3$  по кривой расходов в сечении 1 находится зимний уровень  $Z_1'$ . Далее, в пределах полыньи обычными методами речной гидравлики строится кривая свободной поверхности и в сечении 0 находится зимний уровень  $Z_0'$  при исходном уровне у кромки льда  $Z_1'$  и заданном зимнем расходе  $Q_3$ . По найденному уровню  $Z_0'$  на кривой расходов в сечении 0 находится летний расход  $Q_l$ , коэффициент  $K_3 = \frac{Q_3}{Q_l}$  и подпор  $\Delta H = Z_0' - Z_0$ , где  $Z_0$  — уровень по летней кривой, отвечающий  $Q_3$ .

Соотношения между зимними коэффициентами у кромки льда и непосредственно у сооружений различны и зависят от местных гидрологических, гидравлических, климатических и других условий. Для примера укажем, что на р. Иртыше в нижнем бьефе Шульбинской ГЭС длина полыни при средних температурных условиях декабря определена в 4 км. При величине зимнего коэффициента на кромке льда 0,25 зимний коэффициент в створе ГЭС оказался равным 0,50.

Водноэнергетические расчеты выполняются для определения основных водноэнергетических показателей ГЭС (мощности и количества вырабатываемой энергии) в зависимости от отметки подпора, глубины сработки водохранилища и т. п., а также для установления подробных характеристик работы ГЭС (уровни верхнего бьефа, напоры, расходы и мощности ГЭС) при принятых основных параметрах водохранилища и ГЭС.

Вследствие колебаний естественного стока реки и переменных требований энергетической системы, в состав которой входит ГЭС, мощность не сохраняет постоянной величины. Отсюда возникает необходимость нахождения для мощности ряда значений. Если имеется регулирующее сток водохранилище, мощность ГЭС также зависит и от режима регулирования. В связи с этим для такой ГЭС ставится дополнительная задача — отыскать режим регулирования, который давал бы наибольший энергетический эффект.

Параллельно с водноэнергетическими расчетами производятся энергетические и технико-экономические расчеты. В задачу этих расчетов входит установление роли проектируемой ГЭС в энергетической системе, разработка режима ее работы и, наконец, обоснование ее основных параметров — отметки подпора, глубины сработки водохранилища и установленной мощности ГЭС.

## § 2. ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЭС

Основными элементами при расчетах мощностей ГЭС являются расходы и напоры. После того как найдены значения расходов и напоров, определение развиваемой ГЭС мощности сводится к простейшим вычислениям по формуле (1.9) или (2.9).

Ряд значений мощностей ГЭС, вычисленных за некоторый период, позволяет определить количество вырабатываемой ею энергии.

Рассмотрим порядок расчета водноэнергетических характеристик по календарным гидрологическим рядам для ГЭС, не имеющих водохранилища сезонного или многолетнего регулирования, и для ГЭС, располагающих водохранилищем сезонного или многолетнего регулирования.



Порядок расчета водноэнергетических характеристик ГЭС обобщенными методами рассматривается в § 7.

### ГЭС, работающие без водохранилища сезонного или многолетнего регулирования

Если верхним бьефом ГЭС является водохранилище, не обеспечивающее сезонного или многолетнего регулирования, режим мощностей такой ГЭС будет определяться в основном режимом естественных расходов, получаемых по материалам наблюдений и гидрологических расчетов. В этом случае уровень верхнего бьефа принимается постоянным на отметке НПГ, а нижнего бьефа — на отметках, отвечающих расходам по кривой  $Q=f(Z)$ , в частности зимой — с учетом зимнего коэффициента, устанавливаемого как указано выше.

Применительно к рассматриваемым условиям водноэнергетические расчеты выполняются в форме табл. 1.9.

Таблица 1.9

НПГ 235 м

№ и/л	Дата (интервал)	Расходы, м <sup>3</sup> /сек				Отметка горизонта н. б., м	Напор, м	Мощности 8,5 QH тыс. квт	
		естественные	потери	возможные к использованию	ГЭС			по водотоку	с ограничением по Nu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	IV	908	5	903	903	196,80	38,20	293	
2	V	1190	20	1170	1000	196,25	38,75	385	330
3	VI	854	20	834	834	195,68	39,32	278	
4	VII	605	20	585	585	195,22	39,78	198	
..	...	.....	..	.....	.....	.....	.....	...	...

По разности естественных расходов (гр. 3) и потерь (гр. 4) получают расходы воды, возможные к использованию на турбинах ГЭС (гр. 5). Однако в многоводные периоды вследствие ограниченной пропускной способности турбин (см. § 6) не весь расход может быть использован гидростанцией и часть его будет сброшена вхолостую. Поэтому в графу 6 записывается действительно пропускаемый турбинами расход воды. Отметки уровней нижнего бьефа определяются по расходам графы 5, а если, помимо ГЭС, в нижний бьеф попадает дополнительный расход (включая расход фильтрации), который может оказать влияние на уровни, то нужно учитывать и этот расход. Напор

(гр. 8) находится по разности отметок уровней верхнего бьефа (так как уровень верхнего бьефа постоянен и равен НППГ, то его отметка выписывается над таблицей) и нижнего бьефа. В графу 9 выписываются мощности, вычисленные по формуле (2.9) и по расходам графы 5. В графу 10 заносятся мощности с учетом ограничений по установленной мощности ГЭС (см. ниже). Эти ограничения, так же как и ограничения по используемым расходам (гр. 6), имеют значения лишь для периодов с избыточным стоком.

По данным граф 9 и 10 определяется выработка энергии [по выражению (3.9)] за любой отрезок времени (обычно по годам) и в среднем за весь исследуемый период. Первая из найденных величин дает выработку энергии по водотоку, т. е. как бы потенциальные ресурсы, а вторая — учитывает возможности использования воды турбинами ГЭС. Последняя характеризует наибольшую возможную выработку энергии ГЭС.

### **ГЭС, работающие на зарегулированном водохранилищем водотоке**

Если верхним бьефом ГЭС является водохранилище, осуществляющее сезонное или многолетнее регулирование стока, режим мощностей такой ГЭС будет определяться не только величинами зарегулированных расходов, но и напорами, зависящими как от положения уровня нижнего бьефа, так и от положения уровня верхнего бьефа. Последний находится в прямой зависимости от режима регулирования стока.

Положим, что режим регулирования определен общими условиями работы ГЭС в энергетической системе, и в расчетном периоде зарегулированные расходы заданы календарно (практические рекомендации см. в § 7). Тогда сам расчет регулирования стока выполняется в последовательности, указанной в главе 5, § 5, табл. 2.5. Для получения же водноэнергетических характеристик ГЭС следует дополнительно вычислить возможные к использованию расходы (по разности расходов граф 4 и 12 табл. 2.5) и произвести расчет граф 7—10 табл. 1.9. В этом расчете расходами ГЭС будут служить данные графы 15 табл. 2.5, а напоры будут вычисляться по разности горизонтов верхнего бьефа на середину интервала (графа 10 табл. 2.5) и нижнего бьефа (графа 7 табл. 1.9). Характеристики ГЭС по выработке энергии находятся аналогично предыдущему.

В практике энергетического использования водных ресурсов имеют место примеры, когда регулирующее сток водохранилище не является верхним бьефом ГЭС, так как оно расположено выше по течению на этом же водотоке или на его притоке (с подобного рода примерами мы познакомимся в главе 11). Поскольку в этом случае колебания уровней водохранилища не

будут влиять на напоры ГЭС, расчет водноэнергетических характеристик можно вести по табл. 1.9. При этом в графу 3 вместо естественных надо внести расходы воды, зарегулированные верховым водохранилищем. Методы расчета этих расходов изложены в главе 11.

Результаты расчетов водноэнергетических характеристик ГЭС иллюстрируются хронологическими графиками и кривыми продолжительности. О виде и значении хронологических графиков, характеризующих режим работы водохранилища, уже упоминалось в главе 5, § 4. При водноэнергетических расчетах дополнительно строятся графики уровней водохранилища (вместо графика наполнений водохранилища), напоров и мощностей ГЭС. При этом для зарегулированных расходов и мощностей приводятся графики как без ограничения, так и с ограничением по установленной мощности (рис. 3.9 а).

Давая очень наглядную картину последовательности изменения отдельных элементов режима работы ГЭС, хронологические графики вместе с тем не обрисовывают полностью этого режима. Для полноты представления о режиме работы ГЭС необходимо подсчитать и построить кривые продолжительности. Последние (рис. 3.9 б) характеризуют среднюю за период длительной эксплуатации ГЭС продолжительность (в процентах или в днях для среднего года) поддержания различных величин того или иного элемента режима работы ГЭС. Кривые продолжительности строятся за год в целом или за отдельные его части (сезон, месяц).

### § 3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Характеристики режима электропотребления были даны в § 3 гл. 2. Напомним об определяющих факторах режима электропотребления.

Основные характеристики режима электропотребления определяются:

1. Непрерывным ростом в условиях развернутого строительства всего народного хозяйства Советского Союза.

В водноэнергетических и энергетических расчетах непрерывный рост электропотребления учитывается рассмотрением нескольких этапов (2—3) развития народного хозяйства на ближайшую после пуска ГЭС перспективу в 10—15 лет. На семилетку (1959—1965 гг.) намечен рост электропотребления в СССР в среднем на 12% в год, а в дальнейшем предполагаются еще более высокие темпы прироста энергопотребления.

2. Сезонной неравномерностью, которая более или менее связана с климатическим циклом в году — зимой потребляется энергии больше, чем летом (за счет увеличения осветительной, отопительной и других нагрузок).

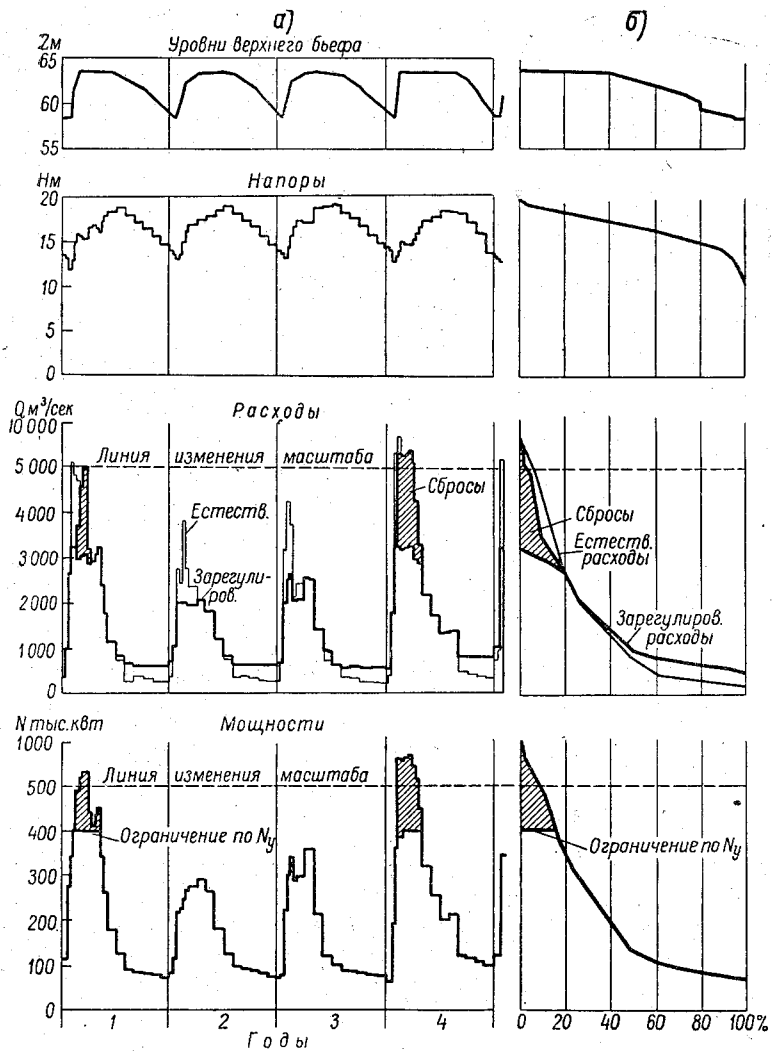


Рис. 3.9. Хронологические графики (а) и кривые продолжительности (б) водноэнергетических характеристик ГЭС.

3. Суточной неравномерностью. Это свойство проявляется в том, что суточный график электрической нагрузки имеет сложную форму — два пика (утренний и вечерний) и два минимума (ночной и дневной).

Суточная неравномерность электрической нагрузки, как ранее указано, зависит от характера потребителей. Наиболее плотные графики свойственны электроемким производствам, наименее плотные — осветительной нагрузке (см. главу 2, § 3).

В соответствии с изменением сезонной нагрузки изменяются в течение года и суточные графики. Поэтому в энергетических расчетах обычно рассматриваются типичные суточные графики нагрузки для всех месяцев года. Однако нередко ограничиваются рассмотрением двух наиболее характерных графиков нагрузки: для зимнего дня — обычно декабря и для летнего дня — обычно июня с наибольшей по мощности нагрузкой.

В графике суточной нагрузки энергосистемы можно выделить (см. рис. 5.9): а) ниже минимальной мощности  $P_{\min}$  — базис графика; б) между  $P_{\min}$  и средней суточной мощностью  $\bar{P}$  — полупиковую часть графика; в) выше  $\bar{P}$ , верхнюю, пиковую часть графика нагрузки.

С повышением плотности графика, т. е. с увеличением коэффициента суточной равномерности  $\gamma = \frac{\bar{P}}{P_{\max}}$  [формула (4.2)] и коэффициента минимума  $\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$  (5.2), базис графика увеличивается, а полупиковая и пиковая части графика соответственно уменьшаются. При комплектовании суточного графика добиваются его максимального уплотнения, что достигается увеличением числа работающих смен на производстве, смещением во времени обеденных перерывов и т. п.

#### § 4. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ГЭС

По условиям участия в покрытии суточного графика электрической нагрузки различают:

- а) ГЭС, работающие без суточного регулирования;
- б) ГЭС, работающие с суточным регулированием.

Возможности ведения суточного регулирования в основном определяются наличием водохранилища достаточной для этого емкости. Таким водохранилищем может служить верхний бьеф приплотинной гидроэлектростанции или специально созданный бассейн суточного регулирования на деривационных ГЭС. (На деривационных ГЭС бассейном суточного регулирования может служить иногда сам деривационный канал.)

У приплотинных ГЭС, в верхнем бьефе которых имеется водохранилище сезонного или многолетнего регулирования, это же водохранилище будет осуществлять и суточное регулирование.

По отношению к потребителям и по энергетической системе ГЭС делятся на работающие изолированно, т. е. на своего собственного потребителя, и в энергетической системе.

При современном развитии энергетического хозяйства изолированно работают по преимуществу малые ГЭС сельского значения, расположенные вдалеке от существующих энергосистем и электросетей. Крупные и большинство ГЭС средней мощности отдают свою энергию в энергетические системы и покрывают часть общего графика нагрузки.

В состав энергетических систем входят гидравлические (ГЭС) и тепловые электрические станции. В процессе дальнейшего развития энергетического хозяйства СССР в состав энергетических систем будут входить также атомные (см. гл. 2), гидроаккумулирующие (см. § 9 настоящей главы) и работающие на использовании энергии морских приливов — приливные электростанции.

Тепловые электростанции делятся на собственно тепловые — ТЭС и тепловые конденсационные — КЭС.

Основная задача ТЭС заключается в выработке тепла, необходимого для ведения технологического процесса ряда производств, а также для теплофикации городов и промышленных населенных пунктов. Вырабатываемая при этом попутно электрическая энергия отдается в энергосистему. Задачей же КЭС является выработка электрической энергии.

В связи с тем что ТЭС работают по тепловому режиму, режим отдачи в систему электрической энергии с шин их генераторов оказывается вынужденным. Поэтому ТЭС не обладают достаточной маневренностью и им заранее отводится место в базисной части графика нагрузки. КЭС же, поскольку специальным назначением их является выработка электрической энергии, обладают необходимой маневренностью и могут принимать участие в покрытии пиковой части графика нагрузки.

Наиболее высокой маневренностью обладают гидроэлектрические станции. При этом, так как для пуска ГЭС и принятия ею большей нагрузки достаточно только увеличить открытие направляющего аппарата турбин, на КЭС это возможно лишь при наличии в котлах высокого давления пара, с чем связано постоянное сжигание большого количества топлива. Поэтому с экономической точки зрения для снятия пиков графика нагрузки целесообразно в первую очередь использовать ГЭС, а затем уже КЭС. В энерго-экономическом отношении, как отмечено в гл. 1, ГЭС отличаются от ТЭС и КЭС тем, что капитальные затраты и срок строительства их больше, а эксплуатационные расходы меньше. На себестоимость вырабатываемой энергии последний фактор имеет решающее влияние, вследствие чего себестоимость энергии ГЭС значительно ниже себестоимости энергии тепловых электростанций.

Большие капитальные затраты при строительстве ГЭС и большой срок строительства объясняются тем, что, кроме самой станции, нужно построить дорогостоящие и трудно выполнимые по условиям производства строительных работ подпорные сооружения.

Меньшие же эксплуатационные расходы на ГЭС обуславливаются простотой эксплуатации в связи с использованием постоянно возобновляющейся энергии водотока, в то время как на ТЭС и КЭС, помимо более дорогого самого процесса эксплуатации, из-за наличия котлов и сжигания топлива, а также значительно более быстрого износа энергетического оборудования необходима добыча и транспортировка топлива от мест добычи до ТЭС и КЭС.

## § 5. УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ ГЭС. КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОКА

### Установленная мощность

Установленной называется мощность, которую максимально может развить электростанция. Она определяется номинальной мощностью установленных на ней агрегатов — турбин и генераторов.

Величина установленной мощности зависит от мощности водотока и той роли, которую будет выполнять электростанция, — будет ли она работать изолированно от других электростанций или войдет в энергетическую систему, будет ли обладать возможностями вести суточное регулирование или такая возможность отсутствует, будет ли на ней размещен резерв мощности системы и т. п.

Здесь мы рассмотрим лишь основные предпосылки, обуславливающие размеры установленной мощности ГЭС.

**Изолированно работающие ГЭС.** Изолированно работающие ГЭС покрывают график электрической нагрузки, не связанный с энергосистемой. Степень гарантии энергоотдачи для таких ГЭС обычно принимается порядка 75—85%. Эта степень назначается в соответствии со значением электропотребителей для хозяйства района влияния ГЭС.

Пусть будут заданы кривая продолжительности средних суточных (или средних месячных) мощностей по водотоку и степень гарантии энергоотдачи ГЭС, например, 80%.

Величина требуемой установленной мощности и размеры покрываемого графика нагрузки определяются в зависимости от того, сможет ли ГЭС или не сможет вести суточное регулирование.

ГЭС не ведет суточного регулирования. По кривой продолжительности для заданной обеспеченности  $p = 80\%$  находим гарантированную мощность  $N_p$  (рис. 4.9 а). Ввиду не-

возможности вести суточное регулирование ГЭС покрывает лишь такой график нагрузки (рис. 4.9 б), максимальная ордината которого  $N_{\text{макс}}$  равна  $N_p$ . В таком случае достаточна установленная мощность

$$N_y = N_{\text{макс}} = N_p. \quad (5.9)$$

В часы провала суточной нагрузки будут иметь место холостые сбросы (на рис. 4.9 б сбросы показаны двойной штриховкой). Так как величиной  $N_p$  характеризуется мощность в маловодную часть года, сбросы будут также иметь место и в остальное время года, когда мощности водотока превышают  $N_p$ .

ГЭС ведет суточное регулирование. При наличии суточного регулирования в периоды работы ГЭС на гарантированной мощности сбросы исключаются, так как в часы провала нагрузки вода накапливается в водохранилище для последующего ее использования в часы повышенной нагрузки. В этом случае ГЭС сможет покрыть больший суточный график нагрузки (рис. 4.9 в) и установленная мощность определится из соотношения

$$N_y = N_{\text{макс}} > N_p. \quad (6.9)$$

Холостые сбросы появятся только в периоды избыточных средних суточных мощностей по отношению к  $N_p$ .

**ГЭС, работающие в энергосистеме.** Для ГЭС, работающих в энергетической системе, имеются большие возможности реа-

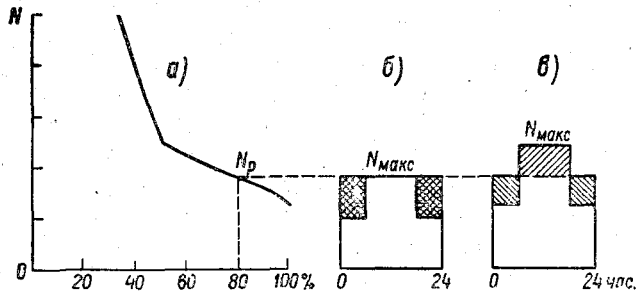


Рис. 4.9. Кривая продолжительности мощностей (а) и графики суточной нагрузки (б и в).

лизации мощностей водотока, поскольку нагрузка системы обычно велика по сравнению с энергоотдачей отдельно взятой электростанции. Поэтому с целью наибольшего использования энергии водотока ГЭС реализует в графике нагрузки не только выработку энергии, определяемую гарантированной мощностью  $N_p$ , но и выработку энергии по более высокой мощности, чем  $N_p$ , в многогодные периоды включительно до установленной мощности  $N_y$ , которая в этих случаях обычно значительно больше  $N_p$ .



Обеспеченность гарантированной энергоотдачи для ГЭС, работающих в энергосистеме, как правило, выше, чем для ГЭС, работающих изолированно, и зависит от роли ГЭС в энергосистеме. Для ГЭС с большим весом в энергосистеме по мощности и электроэнергии обеспеченность принимается равной 95%, а иногда даже и выше (см. гл. 2, § 7).

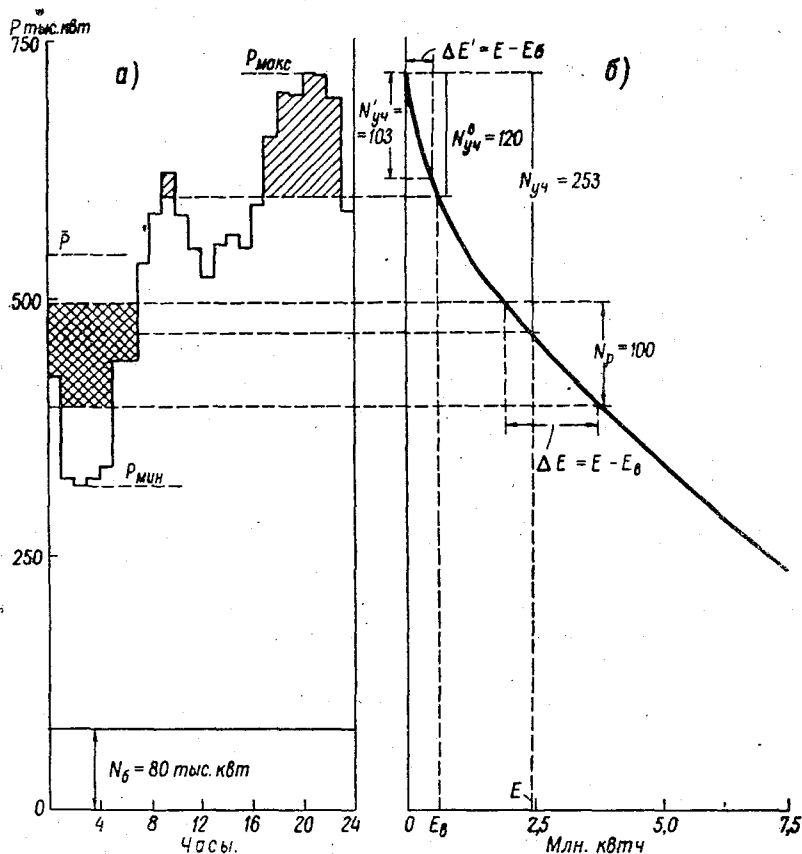


Рис. 5.9. Суточный график нагрузки энергосистемы (а) и анализирующая кривая (б).

Установленная мощность таких ГЭС назначается, исходя из возможностей суточного регулирования и необходимости максимального использования энергии водотока. В этом случае также должна быть задана кривая продолжительности мощностей по водотоку и график суточной электрической нагрузки энергетической системы (рис. 5.9 а).

Расчет установленной мощности ГЭС производится при помощи так называемой анализирующей кривой суточного гра-

фика нагрузки энергосистемы (рис. 5.9 б). Эта кривая представляет собой интегральное выражение площади графика нагрузки. Анализирующая кривая строится или сверху вниз, принимая за нуль площади максимальную ординату графика нагрузки  $P_{\max}$ , или снизу вверх, принимая за нуль площади  $P=0$ . В нашем примере анализирующая кривая построена сверху вниз.

Так как одно измерение графика нагрузки — мощности в *квт* (ординаты), а другое — часы (абсциссы), площадь графика дает выработку энергии за сутки (*квт-ч*). Отсюда анализирующая кривая суточного графика (ее абсциссы) выражает нарастание выработки энергии или от пика (как в приведенном примере), или от основания графика до полной суточной величины.

Для построения анализирующей кривой график нагрузки разбивается на серию элементарных полосок с высотой  $\Delta P$ . Последовательное суммирование площадей этих полосок и дает нарастающую выработку энергии (абсциссы кривой) до различных значений мощности.

ГЭС не ведет суточного регулирования. Если ГЭС не ведет суточного регулирования, то с целью полной реализации выработки энергии по гарантированной мощности  $N_p$  она должна работать в базисе графика нагрузки (рис. 5.9 а). Тогда ее участие в покрытии суточного графика в условиях расчетной обеспеченности выразится мощностью  $N_{\text{уч}} = N_p$ . Отсюда установленная мощность остальных электростанций системы, которые условно назовем тепловыми электростанциями, составит

$$N_{\text{ТЭС}} = N_{\text{макс}} - N_{\text{уч}}. \quad (7.9)$$

Если назначить установленную мощность ГЭС  $N_y = N_{\text{уч}}$ , будет недоиспользована энергия водотока в многоводные периоды, когда  $N > N_p$  (см. рис. 4.9 а), в то время как в графике нагрузки (также в базисной части) такую мощность возможно реализовать. Для повышения использования энергии водотока установленную мощность увеличивают до экономически оправданного предела  $N_y$ . Однако это увеличение установленной мощности, приводящее в целом к повышению использования энергии водотока, не повышает участия ГЭС в покрытии графика нагрузки в маловодных условиях и, следовательно, не вытесняет установленной мощности тепловых электростанций энергосистемы [см. выражение (7.9.)]. Поэтому указанное увеличение установленной мощности по отношению к  $N_p$  называется дублирующей мощностью

$$N_d = N_y - N_p. \quad (8.9)$$

Дублирование мощности должно быть экономически оправдано дополнительной выработкой энергии, реализуемой в графике нагрузки энергосистемы за многоводные периоды.

ГЭС ведет суточное регулирование. Гидростанции, обладающей возможностями вести суточное регулирование, с целью большего вытеснения мощности тепловых электростанций отводится, как правило, пиковая часть графика нагрузки энергосистемы. Суточное регулирование может быть неограниченным и ограниченным.

Неограниченным называется такое регулирование, при котором допускается работа ГЭС с мощностями в диапазоне от  $N_y$  до полной остановки ее в часы провала суточной нагрузки, и в связи с этим прекращение стока в нижний бьеф.

Ограничения суточного регулирования могут возникнуть в результате недостаточных размеров водохранилища или вследствие требований других отраслей народного хозяйства, когда не допускается сброс больших расходов воды или прекращение стока в нижний бьеф по условиям забора воды на водоснабжение, орошение и другие нужды, или поддержания судосходных глубин в навигационное время и отстоя судов в затоках и акваториях судоремонтных заводов зимой. Эти ограничения утрачивают практический смысл, т. е. снимаются с данной ГЭС, если ее нижний бьеф находится в подпоре от нижележащей установки или ее нижним бьефом является естественный водоем (озеро, морской залив и т. п.) и уровни нижнего бьефа практически не зависят (или мало зависят) от расходов.

Для осуществления неограниченного суточного регулирования необходима емкость водохранилища не более чем

$$V_{\max} \leq 0,25 Q_b t_{\text{сут}}. \quad (9.9)$$

Здесь  $V_{\max}$  — максимальный объем, который может понадобиться для суточного регулирования при работе ГЭС полной мощностью в течение 8 часов в сутки и ее полной остановки на 16 часов [10];  $Q_b$  — расход максимальной пропускной способности турбин ГЭС;  $t_{\text{сут}} = 86\,400$  — количество секунд в сутках.

Если размеры имеющейся емкости водохранилища  $V \geq V_{\max}$ , и других ограничений нет, ГЭС может вести неограниченное суточное регулирование.

ГЭС с неограниченным суточным регулированием при работе ее на гарантированной средней суточной мощности  $N_p$  отводится самая верхняя часть графика нагрузки. В многоводные же периоды, когда водотоком обеспечивается средняя суточная мощность  $N > N_p$ , во избежание холостых сбросов воды и потери энергии ГЭС отводится полупиковая, или базисная, часть графика нагрузки.

Откладывая суточную выработку энергии по гарантированной мощности  $E = 24 N_p$  от начала оси абсцисс, по анализирующей кривой найдем верхнюю часть графика нагрузки, которая может быть принята на ГЭС. Высотой этой части графика и определится искомая мощность, которой ГЭС участвует в покрытии

пика графика  $N_{\text{уч}}$  (рис. 5.9). Мощность участия тем больше, чем больше  $N_p$  и чем резче выражена пиковость графика.

Как и в предыдущем случае, установленная мощность тепловых электростанций системы составит (7.9)

$$N_{\text{ТЭС}} = N_{\text{макс}} - N_{\text{уч}}$$

Если водоток хорошо зарегулирован и с увеличением установленной мощности  $N_y$  по сравнению с  $N_{\text{уч}}$  использование энергии повышается незначительно, принимается  $N_y = N_{\text{уч}}$ . При недостаточной зарегулированности водотока возможно заметное повышение использования энергии с увеличением  $N_y$ . Тогда  $N_y$  увеличивают до экономически оправдываемого предела. При этом дополнительного вытеснения установленной мощности тепловых электростанций системы не произойдет и также будет иметь место дублирование мощности (8.9).

В конкретных условиях работы ГЭС с той или иной средней суточной мощностью ограничения по емкости водохранилища устанавливаются сравнением суточной выработки энергии ГЭС  $E$  с запасами энергии водохранилища (так называемым «энергетическим эквивалентом емкости»), определяемыми по выражению

$$E_v = \frac{KVH}{3600} \text{ квт-ч}, \quad (10.9)$$

где  $K$  — коэффициент в формуле мощности;  $V$  — емкость водохранилища в  $\text{м}^3$ ;  $H$  — средний напор в метрах.

Когда  $E_v \geq E$  — ограничений нет.

При наличии ограничений по емкости водохранилища участие ГЭС в покрытии пиковой части графика нагрузки обусловится величиной  $E_v$ . Мощность участия в покрытии пика графика  $N_{\text{уч}}^v$  соответственно энергии водохранилища  $E_v$  определится так же, как в случае, если бы ГЭС не имела ограничений по суточному регулированию (рис. 5.9).

Таким образом, количество энергии  $E_v$  запасается в водохранилище и расходуется на пике графика для получения дополнительной мощности  $N_{\text{уч}}^v$ . Остальную суточную выработку энергии  $\Delta E = E - E_v$  гидроэлектростанция должна выработать, используя средний суточный расход воды и развивая мощность, равную  $N_p$ . Для этой энергии должен быть выделен такой участок графика нагрузки (находится подбором по анализирующей кривой), в котором при мощности  $N_p$  выработка как раз отвечала бы величине  $\Delta E$ . Этому условию удовлетворяет полупиковая часть графика нагрузки, в пределах полосы которой с высотой  $N_p$  имеется понижение нагрузки (на рис. 5.9 показано двойной штриховкой) по площади, равное  $E_v$ . Указанное понижение нагрузки и соответствует той части суточной выработки энергии ГЭС, которая не может быть реализована по графику нагрузки и запасается в водохранилище для покрытия пика графика.

В случае ограничения по емкости водохранилища полная мощность участка ГЭС в покрытии графика нагрузки составит

$$N_{\text{уч}} = N_{\text{уч}}^{\text{в}} + N_p. \quad (11.9)$$

Как и прежде, установленная мощность ГЭС принимается  $N_y = N_{\text{уч}}$  или, если это оправдывается добавочной выработкой энергии,  $N_y > N_{\text{уч}}$ , причем, согласно выражению (8.9), будет иметь место дублирование мощности, равное  $N_y - N_{\text{уч}} = N_{\text{д}}$ .

Если ограничения в суточном регулировании мощности ГЭС вызываются требованиями других отраслей хозяйства, которыми задается минимальный (базисный) в пределах суток расход, необходимый для поддержания какого-то наинизшего уровня воды в нижнем бьефе, по этому расходу находится минимальная мощность  $N_6$ , а по ней  $E_6 = 24N_6$ , размещаемая в базисной части графика нагрузки. Остальной части суточной выработки энергии  $\Delta E' = E - E_6$  отводится вершина графика и определяется  $N'_{\text{уч}}$ . Полная мощность участка в покрытии графика нагрузки составит  $N_{\text{уч}} = N'_{\text{уч}} + N_6$ .

Установленная мощность ГЭС и тепловых электростанций энергосистемы и в этом случае выбирается с учетом соображений, приведенных выше.

Таким образом, применительно к энергетике суточное регулирование имеет очень важное значение, так как оно обеспечивает большее участие ГЭС в покрытии мощностей графика нагрузки и как следствие — большее вытеснение мощности тепловых электростанций энергосистемы. На рис. 5.9 участие ГЭС в покрытии суточного графика нагрузки рассмотрено на конкретном примере при  $N_p = 100$  тыс. *квт* и соответственно  $E = 2,4$  млн. *квт-ч*.

В только что рассмотренных задачах установленная мощность в основном назначалась исходя из покрытия суточного графика нагрузки энергосистемы. Этим, однако, полностью не определяется установленная мощность ГЭС, так как необходимо в энергосистеме иметь резервы мощности. Последние складываются из эксплуатационного (нагрузочного), аварийного и ремонтного резерва. По отношению к величине пика графика нагрузки энергосистемы эксплуатационный резерв составляет 2—5%, а аварийный — до 10%, но не менее мощности наиболее крупного агрегата на одной из электростанций системы. Что касается ремонтного резерва, обеспечивающего работу системы при выводе в ремонт агрегатов электростанций, то величина его зависит от режима электропотребления, состава электростанций и наличия дублирующей мощности в системе. В ряде энергосистем СССР дополнительная мощность для осуществления ремонта агрегатов электростанций не предусмотрена.

В энергосистемах же, в которых преобладают электроемкие производства и имеет место высокая зарегулированность стока на гидроэлектростанциях, установлена дополнительная мощность ремонтного резерва. Величина этой дополнительной мощности определяется специальными энерго-экономическими расчетами.

Обычно резервы мощности размещаются на ГЭС, что обосновывается соответствующими энерго-экономическими расчетами. Если резерв мощности ( $N_{рез}$ ) размещается на проектируемой ГЭС, ее установленная мощность составит

$$N_y = N_{yч} + N_{рез}. \quad (12.9)$$

### Число часов использования установленной мощности

Характеристикой использования мощности электростанции служит так называемое число часов использования установленной мощности  $\tau$ . Оно получается как частное от деления годовой выработки энергии на установленную мощность

$$\tau = \frac{E}{N_y} \text{ час.} \quad (13.9)$$

Электростанции, основная роль которых заключается в покрытии пиковой части графика нагрузки, имеют небольшое (2000—2500) число часов использования установленной мощности. Называются они поэтому «пиковыми». Электростанции, в основном покрывающие базисную часть графика нагрузки имеют большое (6000—8000) число часов использования установленной мощности и называются «базисными». Для большинства крупных электростанций число часов использования установленной мощности равно 4000—5000, чем характеризуется их участие в покрытии как пиковой, так и базисной части графиков нагрузки.

Числом часов использования можно также характеризовать и график электрической нагрузки всей энергосистемы. Тогда это число относится к пиковой мощности графика и станет показателем «плотности» графика: при малом  $\tau$  — пиковым, при большом  $\tau$  — плотным.

Необходимо отметить, что на предварительных стадиях проектирования и при выборе основных параметров ГЭС установленная мощность назначается исходя из числа часов ее использования, учитывая при этом условия работы ГЭС в энергосистеме. Для окончательно же принятого варианта отметки НПГ и горизонта сработки водохранилища установленная мощность уточняется на основе анализа покрытия графика нагрузки, полноты использования энергии водотока, учета необходимых резервов и т. п.

## Коэффициент использования стока

Под коэффициентом использования стока  $\eta$  понимается отношение используемого на ГЭС стока к стоку, который мог бы быть использован при неограниченной пропускной способности турбин, т. е. если бы отсутствовали холостые сбросы. Практически для ГЭС  $\eta$  определяется как частное от деления годовой выработки энергии с учетом ограничения по установленной мощности  $E$  к выработке энергии по водотоку  $E_{\text{вод}}$ , получаемых в результате водноэнергетического расчета (см. § 2 и § 7 настоящей главы)

$$\eta = \frac{E}{E_{\text{вод}}}. \quad (14.9)$$

Коэффициент использования стока зависит от степени осуществляемого регулирования стока  $\alpha$  и величины установленной мощности ( $N_y$ ), увеличиваясь с повышением  $\alpha$  и  $N_y$ .

Для примера укажем, что по Новосибирской ГЭС на р. Оби и Усть-Каменогорской ГЭС на р. Иртыше до постройки выше расположенных крупных водохранилищ  $\eta=0,89$ , а после постройки Каменского (на р. Оби) и Бухтарминского (на р. Иртыше) водохранилищ  $\eta$  повысится соответственно до 0,98 и примерно до 1,0.

## § 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБИН

Эксплуатационные характеристики турбин устанавливаются путем лабораторных испытаний моделей, геометрически подобных турбинам, выполняемых в малом масштабе — диаметр колеса от 0,2 до 0,5 м или несколько больше [1]. Обычно эксплуатационная характеристика строится в координатах: мощность (ось абсцисс) и напор (ось ординат) и связывает мощность—напор—коэффициент полезного действия (рис. 6.9 а). На характеристике наносится линия максимальной мощности турбины (показана наклонной линией со штриховкой), которую она может развить при том или ином напоре и полностью открытом направляющем аппарате. Мощности, отвечающие полному открытию направляющего аппарата турбины, называются *распологаемыми*.

В верхней части характеристики мощность ограничивается по генератору. Линия ограничения мощности по генератору вертикальна (рис. 6.9 а).

Установленная мощность ГЭС лимитируется максимальной мощностью генераторов и равна

$$N_y = N_r n \text{ квт}, \quad (15.9)$$

где  $N_r$  — мощность генератора;  $n$  — количество установленных агрегатов.

От мощности турбины к мощности генератора и обратно переходят через коэффициенты полезного действия (к.п.д.) генератора  $\eta_{\text{г}}$ .

При расчетах ограничений в используемых гидростанцией расходов пользуются кривой пропускной способности турбины (рис. 6.9 б), точки которой вычисляются исходя из максимальных мощностей турбины — генератора

$$Q_{\text{т}} = \frac{N_{\text{т}}}{9,81H\eta_{\text{т}}}, \quad (16.9)$$

где  $\eta_{\text{т}}$  — к.п.д. турбины берется непосредственно с характеристики (рис. 6.9 а).

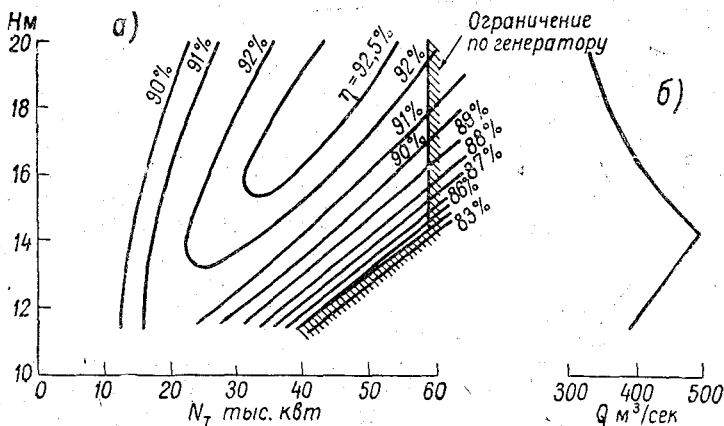


Рис. 6.9. Универсальная характеристика турбины (а) и кривая пропускной способности турбины (б).

Суммарный расход через ГЭС равен

$$Q_{\text{ГЭС}} = Q_{\text{т}} n. \quad (17.9)$$

Как видно на рис. 6.9 а, линии равных к.п.д. замкнуты и, следовательно, для работы турбины имеется оптимальная зона, характеризующаяся более высоким к.п.д. Работая в этой зоне, турбина отдает на единицу используемого расхода наиболее высокую мощность. При увеличении или уменьшении нагрузки относительно оптимума турбина работает с меньшим эффектом. Поэтому в периоды, когда ГЭС не имеет полной загрузки, стремятся распределить нагрузку между агрегатами таким образом, чтобы они работали при более высоких к.п.д.

В зависимости от типа турбины линия располагаемой мощности идет под различным углом наклона к оси абсцисс. При малом угле наклона располагаемая мощность с уменьшением напора резко снижается.



Так как напоры в основном зависят от глубины сработки водохранилища, увеличение сработки приводит к снижению напоров, что неблагоприятно сказывается на располагаемой мощности. Вместе с тем с увеличением глубины сработки увеличивается полезная емкость водохранилища, а с нею и степень регулирования стока (отдачи  $\alpha$ ). Интегральным выражением эффекта сработки водохранилища при энергетическом использовании водотока является гарантированная мощность  $N_p$ . Эта мощность при первоначальном увеличении глубины сработки водохранилища интенсивно растет в связи с заметным возрастанием  $\alpha$  (рис. 17.6), а затем интенсивность роста  $N_p$  понижается и, наконец, при некотором значении глубины сработки (отметки

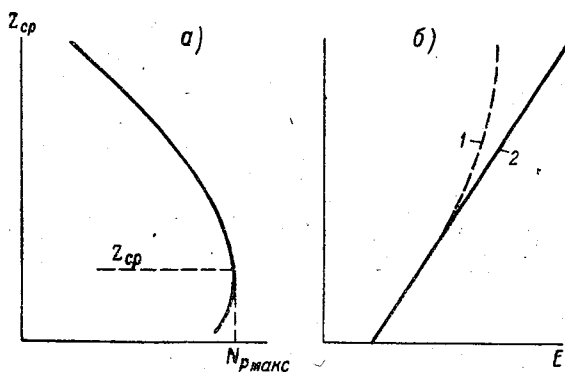


Рис. 7. 9. Кривые зависимости гарантированной мощности (а) и средней годовой выработки энергии (б) от горизонта сработки водохранилища. 1 — при ограничении по  $N_y$ , 2 — по водотоку.

горизонта сработки  $Z_{cp}$   $N_p$  достигает максимума, после чего даже уменьшается (рис. 7.9. а). Уменьшение  $N_p$  после некоторого предела увеличения глубины сработки водохранилища объясняется малым приращением  $\alpha$ , не компенсирующимся падением напора.

Следовательно, с увеличением глубины сработки водохранилища гарантированная мощность повышается, а располагаемая мощность падает. При необходимости в конце сработки водохранилища иметь большую располагаемую мощность по условиям участия ГЭС в покрытии пика графика нагрузки приходится иногда ограничивать эту сработку какой-то меньшей глубиной по сравнению с глубиной при наибольшем  $N_p$ , сознательно идя на некоторую потерю гарантированной мощности.

Помимо указанных факторов, влияющих на выбор целесообразных пределов сработки водохранилища, нужно учитывать

также и то обстоятельство, что с увеличением глубины сработки уменьшается средняя годовая выработка энергии, за исключением первых метров сработки, когда выработка увеличивается вследствие повышения  $\alpha$  и  $\eta$  (рис. 7.9 б, пунктирная линия).

## § 7. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Первоначально водноэнергетические расчеты ведутся в сокращенном объеме для технико-экономического обоснования параметров ГЭС—НПГ, ГМО и  $N_y$ . Впоследствии производятся более подробные водноэнергетические расчеты уже при выбранных параметрах ГЭС (по § 2).

Расчеты для технико-экономического обоснования параметров ГЭС заключаются в последовательном определении водноэнергетических показателей ГЭС для ряда вариантов НПГ в зависимости от глубины сработки водохранилища. Затем для каждого из вариантов НПГ обосновывается оптимальная глубина сработки водохранилища  $h_{ср}$  и установленная мощность  $N_y$ , обеспечивающая участие ГЭС в покрытии графика нагрузки и необходимый резерв мощности. В дальнейшем обосновывается сама отметка НПГ путем сопоставления технико-экономических показателей различных вариантов НПГ при выбранных для каждого из них глубине сработки водохранилища и установленной мощности.

Первый этап расчетов водноэнергетических показателей ГЭС при разных вариантах НПГ и глубины сработки водохранилища обычно производится обобщенными методами. Для этого прежде всего необходимо построить обобщенную водохозяйственную характеристику, связывающую коэффициент регулирования  $\alpha$  с заданной обеспеченностью  $\rho$  и величину потребной для его поддержания емкости водохранилища  $V$  (по форме рис. 17.6). При построении зависимости  $\alpha=f(V)$  в пределах до  $\alpha \leq K_r$  сезонная емкость водохранилища вычисляется по формуле (17.6) или (18.6), а в пределах  $\alpha > K_r$  — по формуле (19.6) или (20.6). Многолетняя емкость находится по графикам Плешкова (см. рис. 4.6), Иванова (см. рис. 10.6 и 11.6) и др.

Далее для всех вариантов НПГ строятся зависимости обеспеченной мощности  $N_p$  и средней многолетней годовой выработки энергии  $E$  от горизонта сработки водохранилища  $Z_{ср}$  (в форме рис. 7.9).

Зависимость  $N_p=f(Z_{ср})$  строится на основе следующего расчета.

Задаются разные глубины сработки водохранилища, начиная, например, с  $h_i=2$  м и кончая  $h_i=0,5 H_{\max}$ , с интервалами через 1 или 2 м (здесь  $H_{\max}$  — максимальный напор при уровне верхнего бьефа на отметке НПГ). По кривой зависимости

$V=f(Z)$  находится полезная емкость водохранилища  $V$  при этих глубинах сработки, а по величинам  $V$ , пользуясь кривой  $\alpha=f(V)$ , — соответствующие значения коэффициентов регулирования  $\alpha$ . Затем вычисляются зарегулированные гарантированные расходы брутто  $Q_{бр}=\alpha\bar{Q}$ , исключением из которых расходов потерь  $q$  (на испарение, фильтрацию и т. д.) определяются используемые на ГЭС гарантированные расходы нетто  $Q$ .

Подсчет гарантированных мощностей производится по формуле  $N=KQH$ . Входящий в эту формулу коэффициент мощности  $K$  принимается в соответствии с § 1.

Средние напоры  $H$  находятся по разности средних горизонтов верхнего и нижнего бьефов. Горизонт верхнего бьефа берется при среднем наполнении водохранилища, которое для периода сработки (что и определяет обеспеченную мощность) обычно составляет около 0,5  $V$ . Горизонт нижнего бьефа находится по полусумме летнего и зимнего горизонтов, пользуясь кривой  $Q=f(Z)$  при расходе  $Q$ .

Расчет гарантированных мощностей удобно вести в форме табл. 2.9.

Таблица 2.9

Отметка НПГ 315 м;  $V_{НПГ} = 54 \text{ км}^3$ ;  $\bar{Q} = 750 \text{ м}^3/\text{сек}$

Глубина сработки, м	Отметка сработки ( $Z_{ср}$ ), м	Емкость, км <sup>3</sup>		Среднее наполнение $V_{Z_{ср}} + 0,5 V$	Средние горизонты бьефов, м	
		$V_{Z_{ср}}$	$V$		верхнего	нижнего
1	2	3	4	5	6	7
10	305	29,0	25,0	41,50	311,00	222,90
12	303	25,7	28,3	39,85	310,40	222,94
..	...	....	....	.....	.....	.....

Средний напор, м	$\alpha$	Расходы, м <sup>3</sup> /сек			$N_p = 8,5 QH$ тыс. квт
		брутто $Q_{бр}$	потерь $q$	нетто $Q$	
8	9	10	11	12	13
88,10	0,865	650	43	607	455
87,56	0,885	664	41	623	465
.....	.....	...	..	...	...

По данным граф 2 и 13 строится зависимость  $N_p=f(Z_{ср})$ .

Параллельно производятся расчеты по определению средней годовой выработки энергии ГЭС в зависимости от горизонтов

сработки водохранилища. Вначале вычисляется средняя годовая выработка энергии водотока, т. е. без учета ограничения по установленной мощности.

Приближенное значение средней годовой выработки энергии водотока находится по среднему расходу  $\bar{Q}$ , уменьшенному на потери  $q$ , и по среднему напору  $H_{\text{ср}}$ . При этом последний берется по горизонту верхнего бьефа при наполнении водохранилища, равном около 0,7  $V$ . Выражение для подсчета выработки энергии водотока имеет вид

$$E_{\text{вод}} = K(\bar{Q} - q) H_{\text{ср}} \cdot 8766 \text{ квт-ч}, \quad (18.9)$$

где 8766 — среднее число часов в году.

Выработка энергии ГЭС с учетом ограничения по установленной мощности подсчитывается из выражения (14.9)

$$E = \eta E_{\text{вод}}$$

Коэффициент использования стока  $\eta$  определяется в зависимости от коэффициента регулирования  $\alpha$  (или емкости водохранилища  $V$ ) и максимально используемого ГЭС расхода  $Q_{\text{в}}$  (установленной мощности  $N_{\text{у}}$ ). Его можно найти по специально разработанным номограммам ([3], рис. 119) или на основе подробно выполненных одноэнергетических расчетов для нескольких вариантов НПП по данной или какой-либо другой ГЭС, расположенной на водотоке с аналогичным гидрологическим режимом.

Полученные зависимости  $N_p = f(Z_{\text{ср}})$  и  $E = f(Z_{\text{ср}})$  и берутся в основу технико-экономического обоснования горизонтов сработки водохранилища (ГМО), а затем и установленной мощности  $N_{\text{у}}$  для каждого из рассматриваемых вариантов НПП.

Надо иметь в виду, что в отдельных случаях из-за недостатка исходных данных или времени технико-экономическое обоснование ГМО и  $N_{\text{у}}$  не производится. Тогда ГМО принимается на отметке, которой отвечает наибольшее значение  $N_p$ . Иногда, впрочем, максимум  $N_p$  наступает при сравнительно глубокой сработке водохранилища. В таких условиях глубину сработки водохранилища рекомендуется принимать не более  $h = 1/3 \cdot H_{\text{макс}}$ . Что касается установленной мощности ГЭС, то она в рассматриваемых случаях обычно назначается по числу часов ее использования.

Если водохранилище располагается выше по течению и уровнями его не определяются напоры ГЭС, расчет  $N_p$  и  $E$  производится аналогично изложенному, но напоры находятся при заданной постоянной отметке верхнего бьефа ГЭС. Выбрав для каждого варианта НПП отметку горизонта мертвого объема водохранилища (ГМО), а также установленную мощность  $N_{\text{у}}$ , технико-экономическим сравнением окончательно обос-

новывается отметка НПГ, при которой затем и выполняются водноэнергетические расчеты по гидрологическому ряду и составляются характеристики режима работы ГЭС. Для осуществления водноэнергетических расчетов по гидрологическому ряду необходимо разработать правила эксплуатации водохранилища, т. е. составить диспетчерский график соответственно масштабам осуществляемого регулирования (см. главу 7).

Дополнительно для облегчения расчетов в зоне работы ГЭС на гарантированном режиме составляется номограмма, с помощью которой назначается зарегулированный расход, обеспечивающий гарантированную мощность  $N_p$  при том или ином наполнении водохранилища.

чем до минимума сводится элемент подбора при расчетах.

Эта номограмма строится в координатах: наполнение водохранилища (ось ординат) — расход ГЭС (ось абсцисс).

Для ее построения необходимо при 5—7 наполнениях водохранилища от НПГ до ГМО подбором определить напор и расход, обеспечивающий заданную мощность.

При построении номограммы указанный подбор осуществляется только в отношении расхода ГЭС и отвечающего ему горизонта нижнего бьефа, так как горизонт верхнего бьефа определяется заданными наполнениями водохранилища  $V$ .

Номограмма  $Q=f(V)$  (рис. 8.9) строится как для периода открытого русла, так и для зимы, т. е. когда вследствие дополнительных сопротивлений движению потока связь  $Q=f(Z)$  нарушается и необходимо ввести зимний коэффициент  $K_z$ . Значение этого коэффициента устанавливается в соответствии с § 1.

При сезонном регулировании расчет водноэнергетических характеристик начинается с начала гидрологического ряда или с начала водохозяйственных лет, если водноэнергетические характеристики составляются по отдельным характерным годам.

При многолетнем регулировании эти расчеты начинаются внутри гидрологического ряда, с начала наиболее затяжного и глубокого маловодья, где водохранилище принимается доверху наполненным за счет избыточного стока в предшествующий многоводный период. От этого момента расчет ведется ходом вперед до конца ряда. Полученное наполнение водохранилища в конце ряда для соблюдения баланса стока принимается

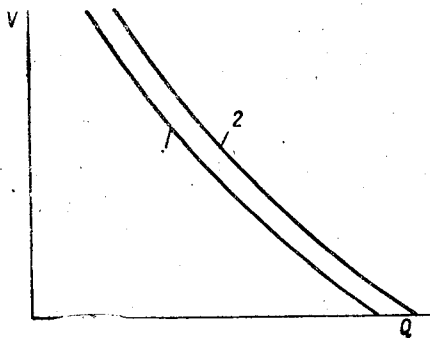


Рис. 8.9. Номограмма для определения по наполнению водохранилища расхода ГЭС, обеспечивающего гарантированную мощность  $N_y$ .

1 — летняя, 2 — зимняя

При сезонном регулировании расчет водноэнергетических характеристик начинается с начала гидрологического ряда или с начала водохозяйственных лет, если водноэнергетические характеристики составляются по отдельным характерным годам.

При многолетнем регулировании эти расчеты начинаются внутри гидрологического ряда, с начала наиболее затяжного и глубокого маловодья, где водохранилище принимается доверху наполненным за счет избыточного стока в предшествующий многоводный период. От этого момента расчет ведется ходом вперед до конца ряда. Полученное наполнение водохранилища в конце ряда для соблюдения баланса стока принимается

в начале ряда и расчет продолжается до момента, откуда начат первоначальный расчет.

Расчет ведется в форме табл. 2.5 и 1.9. В таблице даются две графы мощности: первая без ограничения, а вторая — с ограничением по установленной мощности. Установленная мощность принимается по числу часов ее использования  $\tau$  или обосновывается как указано выше. При назначении установленной мощности по числу часов использования предварительно определяется средняя (за расчетный период) годовая выработка энергии по водотoku  $E_{\text{вод}}$  без ограничения по установленной мощности по выражению (если расчет ведется по средним месячным величинам)

$$E_{\text{вод}} = \frac{\Sigma N \cdot 730,5}{n} \text{ кВт}\cdot\text{ч}, \quad (19.9)$$

где  $\Sigma N$  — сумма средних месячных мощностей за весь расчетный период (за целое число водохозяйственных лет) в кВт; 730,5 — число часов за месяц;  $n$  — число лет периода.

Далее, определив установленную мощность [из выражения (13.9)].

$$N_y = \frac{E_{\text{вод}}}{\tau}$$

и округлив ее (до 100 или 1000 кВт или до другой какой-либо величины), вводят ее в расчет и соответственно ограничивают максимальные мощности. Затем подсчитывается средняя годовая выработка ГЭС  $E$  при принятой  $N_y$ , т. е. с ограничениями (по второй графе).

По (14.9) находится коэффициент использования стока

$$\eta = \frac{E}{E_{\text{вод}}}.$$

По результатам расчетов строятся хронологические графики и кривые продолжительности водноэнергетических характеристик ГЭС: хода уровней верхнего бьефа, напоров, расходов (естественных и зарегулированных) и мощностей. При этом на графиках и кривых продолжительности зарегулированных расходов и мощностей наносятся ограничения по установленной мощности (см. рис. 3.9).

### § 8. ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ СУТОЧНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

При суточном регулировании, в отличие от других видов регулирования, изменения расходов происходят очень быстро, поэтому движение воды в верхнем и нижнем бьефах установки носит неустановившийся характер.

С увеличением нагрузки ГЭС, т. е. с увеличением потребляемого турбинами расхода по сравнению со средней суточной величиной, происходит изъятие воды из верхнего бьефа и слив ее в нижний бьеф, вследствие чего в верхнем бьефе образуется волна сработки (отрицательная волна), а в нижнем бьефе — волна наполнения (положительная волна). Волна сработки вызывает понижение уровня верхнего бьефа, распространяющееся вверх против течения, волна наполнения — повышение уровня нижнего бьефа, распространяющееся вниз по течению. Результатом понижения уровня верхнего бьефа и повышения уровня нижнего бьефа является уменьшение напора ГЭС.

При снижении нагрузки ГЭС наблюдается обратная картина — в верхнем бьефе образуется волна повышения уровня, распространяющаяся вверх против течения, а в нижнем бьефе — волна понижения уровня, распространяющаяся вниз по течению. Результатом повышения уровня верхнего бьефа и понижения уровня нижнего бьефа является увеличение напора ГЭС.

Скорость распространения волны неустановившегося режима определяется по выражению

$$v = \sqrt{gh} \pm v_0, \quad (20.9)$$

где  $h$  — глубина потока в метрах;  $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$  — ускорение силы тяжести;  $v_0$  — скорость потока при установившемся режиме в  $\text{м/сек}$ .

Знак плюс отвечает условиям распространения волны в нижнем бьефе (по течению), знак минус — в верхнем бьефе (против течения).

Дополнительный объем воды, вытекший из верхнего бьефа за какой-то промежуток времени  $\Delta t$  и вызвавший в нем понижение уровня, вливаясь в нижний бьеф, разместится в нем в пределах участка распространения положительной волны. При этом вследствие значительной ширины подпертого верхнего бьефа изъятие из него даже сравнительно большого объема воды обычно не вызывает сколько-нибудь существенного понижения уровня. В нижнем же бьефе, наоборот, вследствие меньшей ширины естественного русла излив дополнительного объема воды приводит к более или менее резкому повышению уровня.

Аналогичным образом задержание некоторого объема воды в верхнем бьефе также не вызывает заметного повышения его уровня, в то время как в нижнем бьефе наблюдаются несравненно большие понижения уровня.

Наиболее значительные изменения уровней в нижнем бьефе имеют место в створе ГЭС. Ниже по течению эти изменения постепенно затухают и в некотором удалении от ГЭС становятся мало заметными. Протяжение, на которое распространяется

влияние неустановившегося режима при суточном регулировании, зависит от характера графика расходов и гидравлических особенностей русла: уклона, ширины, глубины, формы поперечных сечений.

При острых формах суточного графика нагрузки — резких, но непродолжительных пиках и провалах колебания расходов и уровней затухают в пределах относительно коротких участков реки. Нерезкие, но продолжительные изменения графика нагрузки оказывают влияние на уровни и расходы в пределах значительной длины реки. Чтобы составить некоторое представление о характере колебаний уровней в нижнем бьефе ГЭС при суточном регулировании, рассмотрим пример.

Гидроэлектростанция на реке со средним годовым расходом  $1630 \text{ м}^3/\text{сек}$  и при средней ширине русла в нижнем бьефе около  $800 \text{ м}$  ведет суточное регулирование по очень неравномерному графику.

В максимальные по нагрузке зимние сутки расходы изменяются от  $250 \text{ м}^3/\text{сек}$  (в ночные часы) до  $1810 \text{ м}^3/\text{сек}$  (в вечерний пик) при среднем суточном расходе  $950 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Работа по такому графику приводит к колебаниям уровня нижнего бьефа с амплитудой, равной: в створе ГЭС —  $2,0 \text{ м}$ , на расстоянии  $10 \text{ км}$  —  $1,3 \text{ м}$ , на расстоянии  $25 \text{ км}$  —  $0,8 \text{ м}$  и на расстоянии  $63,8 \text{ км}$  —  $0,3 \text{ м}$ .

В максимальные по нагрузке летние сутки расходы изменяются от  $750$  до  $1830 \text{ м}^3/\text{сек}$  при среднем суточном расходе  $1150 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Эти колебания расходов обуславливают изменения уровней за сутки: у ГЭС на  $0,8 \text{ м}$ , на расстоянии  $10 \text{ км}$  на  $0,6 \text{ м}$ , на расстоянии  $25 \text{ км}$  на  $0,3 \text{ м}$  и на расстоянии  $63,8 \text{ км}$  на  $0,2 \text{ м}$ .

На рис. 9.9 изображены графики расходов и уровней и продольный разрез уровней, взятые из работы [3], с наглядностью показывающие указанный процесс затухания колебаний расходов и уровней в нижнем бьефе по мере удаления от створа гидроэлектростанции. Последний график также показывает, что в связи с изливом большого объема воды в относительно короткий отрезок времени уклоны свободной поверхности в нижнем бьефе первоначально резко увеличиваются по сравнению с уклоном установившегося режима, а затем при уменьшении излива уклон сильно уположивается, приближаясь к установившемуся или даже становясь меньше его. В результате резких колебаний уклонов обычные гидравлические зависимости  $Q=f(Z)$  перестают быть однозначными и ими при неустановившемся режиме для непосредственного снятия отметок уровней по заданным расходам, как правило, пользоваться нельзя.

Расчеты суточного регулирования относятся к области гидравлики неустановившегося движения. Они весьма сложны, так как требуется совместное решение двух уравнений: неразрывности (баланса) и равновесия.



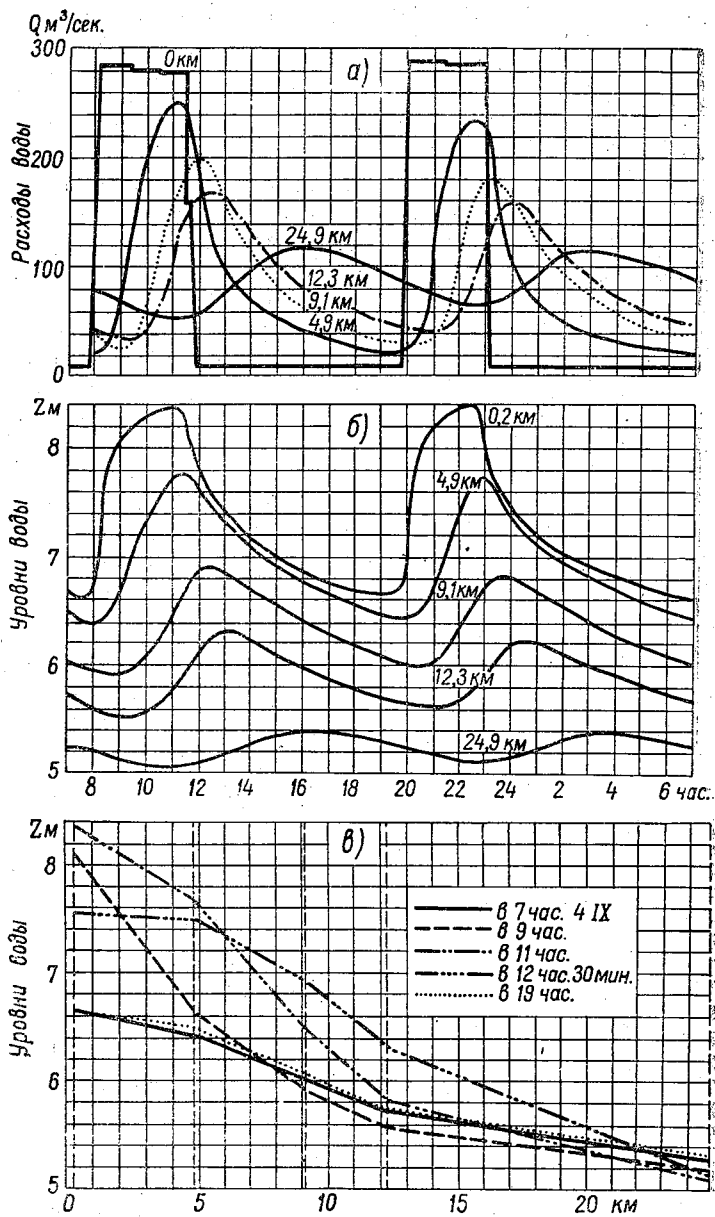


Рис. 9.9. Графики расходов (а), уровней воды (б) и мгновенные профили (в) в нижнем бьефе ГЭС при суточном регулировании.

Предложен ряд методов расчета неустановившегося режима, основными из которых являются метод характеристик академика С. А. Христиановича и метод мгновенных режимов Н. М. Бернадского.

Метод характеристик обычно применяется в тех случаях, когда силы инерции сопоставимы по величине с силами сопротивления движению воды и ими поэтому нельзя пренебречь [5]. Если же силами инерции можно пренебречь, расчеты ведут более простым и наглядным способом мгновенных уровней [6], [7], [8], [9] и др.

Характер колебаний уровней верхнего и нижнего бьефов при суточном регулировании представляет большой практический интерес в отношении влияния на: а) выработку энергии ГЭС; б) располагаемую мощность ГЭС; в) условия судоходства, водозабора и пр.

Суточное регулирование вызывает некоторую потерю выработки энергии. Эта потеря обуславливается тем, что в часы работы ГЭС на пиках графика используются большие расходы при пониженных напорах (главным образом, как указано, за счет повышения уровня нижнего бьефа). Работа же ГЭС в часы провала нагрузки хотя и происходит при повышенных напорах, однако используемые здесь расходы невелики и это не компенсирует потерю энергии в часы пика.

Следовательно, если бы ГЭС работала в течение суток равномерным расходом и при постоянном напоре, она выработала бы энергии больше, чем при неравномерном режиме работы.

Потери энергии от проведения суточного регулирования особенно ощутимы на низконапорных установках и могут достигать 3—5% суточной выработки энергии. На установках с более или менее значительными напорами относительные потери энергии невелики.

На одной из гидростанций, средний напор которой равен 16,6 м, потери выработки энергии, вызываемые суточным регулированием, определились для зимних месяцев в 1,7% и для летних — в 0,7%, а в среднем за годовой период в 1,2%. При годовой выработке энергии этой ГЭС 1700 млн. квт-ч потери в среднем составляют около 20 млн. квт-ч. Снижение напора при повышении уровня нижнего бьефа (и понижении уровня верхнего бьефа), совпадающего по времени с наиболее высокой нагрузкой, может уменьшить располагаемую мощность и тем самым ограничить участие ГЭС в покрытии пика суточного графика нагрузки. С изменением расходов и уровней в нижнем бьефе ГЭС при суточном регулировании изменяются и скорости течения, увеличиваясь в часы пика и снижаясь в часы провала нагрузки. Большая амплитуда колебания уровней за сутки и наличие значительных скоростей течения может неблагоприятно сказаться на условиях судоходства, затрудняя отстой судов

вблизи ГЭС, погрузочно-разгрузочных работ и плавание судов при подходе к сооружениям. Уменьшение же расходов и связанное с этим понижение уровня нижнего бьефа в часы провала нагрузки в навигационное время может вызвать снижение гарантийной глубины судового хода в зоне влияния неустановившегося режима или нарушить нормальную работу отводящих воду сооружений. В зимнее время аналогичное снижение уровня может неблагоприятно отразиться на условиях отстоя судов в затонах и ремонтных заводах и также затруднить работу водозаборных и других сооружений.

## § 9. ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ

Гидравлическое аккумулирование заключается в создании запасов энергии в высоко расположенном бассейне, в который вода подается насосами.

Необходимость гидравлического аккумулирования энергии может быть вызвана:

1. Отсутствием или недостаточностью на гидростанции емкости водохранилища, вследствие чего, работая без суточного регулирования, она вынуждена в часы провала графика нагрузки сбрасывать воду помимо турбин. Эти сбросы, однако, можно не делать и на выработанной за их счет энергии перекачивать воду насосами из нижнего бьефа ГЭС в высоко расположенный бассейн. Созданный в нем запас воды затем может быть снова использован на соответственном напоре для выработки энергии в часы пика графика нагрузки.

В этом случае гидроаккумулирующая установка должна иметь: а) высоко расположенный бассейн; б) напорный трубопровод; в) насос для подъема воды; г) турбину и генератор для выработки энергии при работе на высоком напоре. (Возможно соединение функций насоса, турбины и генератора в одном турбонасосном, т. е. обратимом агрегате).

Если емкость бассейна велика, такая установка, помимо суточного, смогла бы осуществить недельное и даже сезонное регулирование.

При наличии в энергосистеме другой ГЭС с водохранилищем достаточной емкости последнее также можно использовать для аккумулирования избыточной энергии первой ГЭС. Для этого пришлось бы построить только насосный агрегат для качания воды из нижнего бьефа первой в верхний бьеф второй ГЭС.

2. Стремлением улучшить режим работы тепловых электростанций и их энергоэкономические показатели.

Дело в том, что при работе тепловых электростанций с переменной нагрузкой значительно увеличивается удельный расход топлива на 1 квт-ч вырабатываемой энергии. Работая же

по ровному графику и запасая на избыточной энергии воду в высоко расположенном бассейне как бы извлекается двойная польза — запасается энергия для последующего использования в часы пик и улучшаются энергоэкономические показатели тепловых электростанций. Очевидно, для осуществления гидроаккумулирования здесь нужно иметь те же элементы (бассейн, трубопровод и пр.), что и при использовании с той же целью избыточной энергии незарегулированной ГЭС.<sup>1</sup>

О влиянии режима работы ТЭС на ее энергоэкономические показатели можно составить суждение по следующему примеру. На одной из запроектированных в СССР крупных тепловых электростанций при переходе от работы по более или менее ровному режиму (число часов использования установленной мощности 7000) к неравномерному режиму (число часов 4000) повышается себестоимость энергии на 35% [12].

Гидравлическое аккумулирование сопровождается значительной дополнительной потерей энергии, которая в основном обуславливается перекачкой воды в высоко расположенный бассейн (примерно 20% затрачиваемой энергии).

В мировой практике известно немало примеров осуществленного гидроаккумулирования.

По имеющимся данным суммарный коэффициент полезного действия полного цикла аккумулирования колеблется от 50 до 65%. Это означает, что затраченная на перекачку воды энергия в количестве, например, 100 *квт-ч*, возвращается в энергосистему в количестве 50—65 *квт-ч*. За счет использования зааккумулированной энергии в непродолжительный период прохождения пика графика нагрузки вытесняется довольно значительная мощность тепловых электростанций. Соответственно на величину этого вытеснения уменьшается требуемая в системе суммарная мощность последних.

Ожидаемое в СССР увеличение пиковости графиков нагрузки при общем огромном росте энергопотребления должно привести к повышению участия тепловых электростанций в покрытии пиковой части графиков, а отсюда и к ухудшению их энергоэкономических показателей. В этих условиях могла бы возрасти роль гидроаккумулирования энергии в нашей стране. Однако в равнинных районах капитальные затраты, связанные с осуществлением этого мероприятия, вряд ли оправдаются.

---

<sup>1</sup> Имеют место также случаи использования в качестве аккумулирующего бассейна верхних бьефов гидроэлектростанций, работающих на покрытие пиков нагрузки энергосистемы (канал имени Москвы). При этом в часы провалов нагрузки агрегаты ГЭС работают как насосы, накачивая воду из нижнего бьефа в верхний за счет энергии, получаемой от ТЭС энергосистемы, а в часы пиковой нагрузки отдают в энергосистему мощность, значительно повышенную как за счет накопленного притока, так и за счет перекаченной воды.

В районах же с горным рельефом в будущем возможно внедрение гидроаккумулирования.

Опыт применения в СССР гидроаккумулирования имеется. Насосные станции канала имени Москвы, работая в обратимом режиме, использовались в роли гидроаккумулирующих установок для выработки энергии на покрытие пиков графика нагрузки Московской энергосистемы. В период Великой Отечественной войны это имело большое народнохозяйственное значение. Теперь же в связи с увеличением нагрузок энергосистемы роль гидроаккумулирования снизилась. Любопытно отметить, что при проектировании насосов требования обратимости вовсе не учитывались. Тем не менее при работе в турбинном режиме их к.п.д. составил 0,80 при среднем к.п.д. 0,85 в насосном режиме.

В некоторых странах с преобладанием тепловой энергии задача улучшения энерго-экономических показателей успешно решается постройкой гидроаккумулирующих установок.

Мощность гидроаккумулирующих установок стран Западной Европы с 670 тыс. *квт* в 1946 г. поднялась до 2 млн. *квт* в 1957 г. Кроме того, осуществляются планы строительства этих электростанций в Англии на 3 млн. *квт*, в Германии и Люксембурге на 2 млн. *квт* [12].

Из известных в литературе примеров [1] и [13] наиболее значительный используемый на гидроаккумулирующих установках напор равен 1650 м<sup>1</sup>, мощность — около 170 тыс. *квт* и емкость водохранилища, выраженная в запасах энергии, — 110 млн. *квт-ч*.

На строящейся Киевской ГЭС на Днестре создается первая в Советском Союзе гидроаккумулирующая установка. Ее водохранилище разместится на высоком правом берегу реки. Длина трубопровода равна 400 м; насосами установки будут служить турбины ГЭС.

Имеются проекты постройки гидроаккумулирующих установок для Московской и Ленинградской энергетических систем. Предполагаемая мощность последней почти в полтора раза больше мощности наиболее значительной существующей зарубежной установки.

Максимальная мощность запроектированной за рубежом гидроаккумулирующей установки составляет 300 тыс. *квт* [12].

#### Л и т е р а т у р а

1. Морозов А. А. Использование водной энергии. Госэнергоиздат, Л. — М., 1948.
2. Никитин С. Н. Методика водноэнергетических расчетов. Госэнергоиздат, М., 1949.

<sup>1</sup> На ряде установок преодолеваемый при заполнении бассейна напор меньше напора, используемого при сработке бассейна.

3. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1952.
4. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Номограммы для водноэнергетических расчетов. Гидротехническое строительство, № 5—6, 1944.
5. Мелещенко Н. Т. и Якубов М. С. Методика расчета прерывной волны в призматическом русле. Методика расчетов неустановившегося движения в открытых руслах по методу академика С. А. Христиановича. Изв. ВНИИГ, т. XXXVIII, 1948.
6. Бернадский Н. М. Речная гидравлика, ее теория и методология, т. 1, Госэнергоиздат, Л.—М., 1933.
7. Архангельский В. А. Расчеты неустановившегося движения в открытых водотоках. Изд. АН СССР, 1947.
8. Гильденблат Я. Д., Макулов В. В., Семиколенов А. С. Неустановившийся режим нижнего бьефа гидроэлектростанции. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 2, изд. АН СССР, 1947.
9. Рахманов А. Н. О неустановившемся движении в нижних и верхних бьефах речных гидроустановок при суточном регулировании стока и плановых, аварийных или катастрофических — сравнительно быстрых — изменениях гидравлического режима гидроузлов. Изв. ВНИИГ, т. XXX, 1941 и т. XXXI, 1946.
10. Андреев В. Г. Анализ графика отдачи при суточном регулировании стока. Труды ГГИ, вып. 9 (63), 1948.
11. Коренистов Д. В. Исследования к выбору обеспеченной и установленной мощности гидростанции, работающей с суточным регулированием в энергетической системе. Сб. «Проблемы регулирования речного стока», вып. 4, изд. АН СССР, 1950.
12. Бернштейн Л. Б. Повышение эффективности низконапорных ГЭС. Гидротехническое строительство, № 1, 1959.
13. Сиваков Е. Р. Насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции. Госэнергоиздат, Л.—М., 1952.

## ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

### РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАВОДОЧНОГО СТОКА

#### § 1. ЗАДАЧИ И СРЕДСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАВОДОЧНОГО СТОКА

Регулирование паводочного стока производится с целью уменьшения максимальных расходов воды, пропускаемых в нижний бьеф сооружений. Этим достигается уменьшение размеров водопропускных устройств и предотвращаются наводнения на участках рек, расположенных ниже регулирующих водохранилищ. Указанная задача отличается от рассмотренных ранее задач, целью которых являлось повышение низкого стока. Понятно, что и тогда паводочный сток задерживался водохранилищами. Однако это задержание преследовало цель создания необходимых запасов воды для последующего их использования, а уменьшение пропускаемых в нижний бьеф максимальных расходов как самостоятельная задача не ставилась.

Здесь будет рассмотрено именно регулирование паводочного стока для уменьшения максимальных расходов воды.

На водотоках с половодьем от снеготаяния, время наступления и примерная величина которого поддаются некоторому предвидению, регулирование высокого стока осуществляется емкостью водохранилища, предназначенной для ежегодной обязательной сработки и наполнения. Такой емкостью, как известно, при сезонном регулировании является вся полезная призма водохранилища, а при многолетнем регулировании — лишь сезонная составляющая.

На водотоках же, где паводки формируются под влиянием дождей и ливней (например, на реках Дальнего Востока), время наступления и величина которых заранее не может быть предвидена, для регулирования паводков должна создаваться специальная (резервная) емкость водохранилища. Специальная емкость создается сверх емкости, предназначенной для регулирования с целью повышения стока маловодных периодов.

Кроме того, при пропуске очень больших половодий и паводков обычно допускается некоторое повышение уровня водохра-

нилища сверх отметки НПГ, т. е. форсировка уровня. В таких случаях в регулировании паводочного стока принимает участие и призма форсировки.

## § 2. УСЛОВИЯ ДОПУСТИМОСТИ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАВОДОЧНОГО СТОКА ПО СТАТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

Топографические характеристики водохранилища в виде зависимости  $V=f(Z)$  строятся в предположении горизонтальности его водного зеркала, что соответствует гидростатическому равновесию, наблюдающемуся при неподвижности наполняющей и

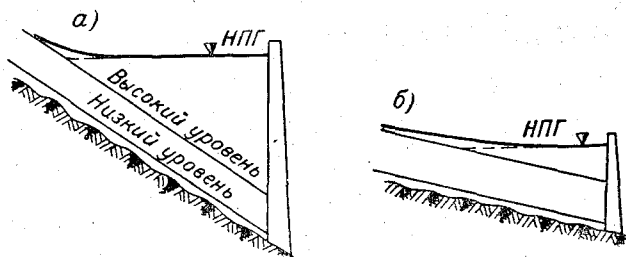


Рис. 1.10. Водохранилища допускающее (а) и недопускающее (б) расчет регулирования паводков по статической емкости.

срабатывающей водоем жидкости. В связи с этим емкости водохранилища, взятые по этим зависимостям, называют статическими.

Статические емкости не всегда могут правильно характеризовать содержащиеся в водохранилище объемы воды, поскольку зеркало в ряде случаев отклоняется от горизонтального положения. Это отклонение определяется очертаниями кривой свободной поверхности, форма которой зависит от высоты подпора у плотины, гидравлических свойств русла и от величины и распределения расхода по длине потока. При прочих равных условиях, чем меньше подпор и больше расход, тем сильнее кривая свободной поверхности отклоняется от горизонтальной линии. Поэтому для установок, подпор которых значительно превышает амплитуду колебаний естественных уровней используемого водотока (рис. 1.10 а), негоризонтальность водного зеркала мола и неучет ее практически не сказывается на правильности водохозяйственных расчетов. В таких случаях расчеты регулирования паводков или расчеты трансформации паводочного гидрографа выполняются по статическим емкостям водохранилища. Для установок же с небольшим подпором естественных уровней (рис. 1.10 б) негоризонтальность зеркала значительна и



неучет ее существенно исказит результаты водохозяйственных расчетов, следовательно, пренебрегать ею нельзя. В подобных случаях расчеты регулирования паводков должны основываться на зависимостях, отражающих при заданном режиме поступления и расходования воды в верхнем бьефе действительные очертания водной поверхности, т. е. по динамическим емкостям водохранилища.

При рассмотрении задач регулирования паводков, так же как это делалось ранее при регулировании с целью повышения низкого стока, будем исходить из допустимости расчетов по статической емкости водохранилища. С расчетами же регулирования паводков по динамической емкости познакомимся лишь в самых общих чертах (в конце настоящей главы), так как подобная задача относится к области речной гидравлики.

### § 3. РАСЧЕТНЫЕ ГИДРОГРАФЫ

Расчетные условия для пропуска паводков через гидротехнические сооружения регламентируются соответствующими нормативами. В 1957 г. в практику проектирования введены «Нормы и технические условия для расчета максимальных расходов воды при проектировании гидротехнических сооружений на реках» (СН 2-57).

Согласно СН 2-57, размеры водопропускных отверстий должны рассчитываться на пропуск нормального паводка (нормальные условия) при горизонте верхнего бьефа на отметке нормального подпорного горизонта (НПГ) и проверяться на пропуск катастрофического паводка (чрезвычайные условия) при отметке катастрофического подпорного горизонта (КПГ). Отметка КПГ превышает отметку НПГ на высоту допустимого по местным условиям подъема (форсировки) уровня верхнего бьефа, который будет иметь место непродолжительно и в исключительно редких случаях при проходе по реке катастрофических паводков.

Первым расчетом определяются основные размеры водопропускных отверстий в условиях работы сооружений с нормальными запасами возвышения гребня плотины над горизонтом воды, прочности и устойчивости сооружений. Вторым расчетом проверяется работа сооружений при исключительно высоком паводке, при соответственно сниженных запасах возвышения гребня плотины над горизонтом воды, прочности и устойчивости сооружений.

В зависимости от класса капитальности, к которому относится проектируемое сооружение, величины расходов, подлежащих пропуску через водопропускные отверстия, должны отвечать следующим вероятностям ежегодного превышения (табл. 1.10).

Таблица 1.10

Условия эксплуатации	Расчетная вероятность превышения максимальных расходов воды в процентах				
	Класс капитальности сооружений				
	I	II	III	IV	V
Нормальные . . . . .	—	—	3	5	10
Чрезвычайные . . . . .	0,01	0,1	0,5	1	—

Для сооружений I и II классов расчетные вероятности превышения максимальных расходов в нормальных условиях не указаны. Эти сооружения обычно проектируются на пропуск катастрофического расхода при заданной отметке КПГ, а фактическая вероятность превышения нормального расхода определяется по пропускной способности отверстий при горизонте верхнего бьефа на отметке НПГ.

Высота допустимой форсировки уровня на разных гидроузлах бывает весьма различной и устанавливается в проекте на основании технико-экономического сопоставления ряда вариантов пропускной способности гидроузла (длины водопропускного фронта или числа отверстий), а отсюда и отметки гребня подпорных сооружений. В каждом из этих вариантов высота форсировки уровня определяется расчетом трансформации катастрофического паводка.

Например, для водохранилища Бухтарминской ГЭС максимальная форсировка уровня сверх отметки НПГ принята равной 0,9 м, для Новосибирского водохранилища — 2,2 м, для Куйбышевского — 2,3 м и т. д.

Указанная в табл. 1.10 вероятность ежегодного превышения максимальных расходов воды принимается как в случае отсутствия регулирования паводков, так и при осуществлении регулирования. При этом в последнем случае вероятность превышения зарегулированных максимальных расходов считается одинаковой с вероятностью превышения исходных для расчета паводков. Основными элементами расчетных паводков являются: объем, величина максимума и форма гидрографа.

Объем паводка и величина максимума заданной вероятности превышения находятся по кривым обеспеченности, параметры которых — средние величины и коэффициенты изменчивости — определяются на основе статистической обработки данных имеющихся наблюдений, а при их отсутствии — косвенными методами. Коэффициенты асимметрии устанавливаются в нормативном порядке, в соответствии с режимом водотока. При этом

объемы обычно берутся за стандартный отрезок времени той длительности, которая отвечает наиболее растянутым паводочным волнам. В пределах этого отрезка времени в каждом году гидрологического ряда и отбираются наибольшие объемы стока. При следовании одной за другой ряда волн выделенный стандартный отрезок времени должен охватывать весь паводочный период. Тогда объемы стока можно брать в границах календарных отрезков времени, отвечающих началу ранней и концу поздней волны паводков.

Гидрографам расчетных паводков обычно придается форма, типичная для наибольших наблюдаемых паводков рассматриваемого водотока. Ординаты расчетных гидрографов определяются пересчетом ординат гидрографов наблюдаемых паводков, взятых за модели. При недостатке или отсутствии данных наблюдений гидрографы расчетных паводков строятся по аналогии с хорошо изученными створами или другими водотоками, или по теоретическим схемам — треугольнику, трапеции, в форме биномиальной кривой и др. [4], [5].

Для пересчета ординат гидрографов-моделей в ординаты расчетных гидрографов пользуются коэффициентами:

$K_1 = \frac{Q_p}{Q}$  — когда водохранилище располагает небольшой емкостью и возможное его участие в «срезке» паводка ограничивается гребнем волны, непосредственно примыкающим к ее максимуму. В этом случае решающее значение имеет величина максимального расхода и острота пика гидрографа;

$K_2 = \frac{W_p}{W}$  — когда водохранилище располагает большой емкостью и его участие в регулировании паводков значительно. В этом случае решающее значение имеет не столько высота пика, сколько объем паводка, так как регулированием охватывается значительная часть периода паводка.

В приведенных выражениях:

$Q_p$  и  $W_p$  — максимум и объем паводка заданной вероятности превышения;  $Q$  и  $W$  — максимум и объем паводка-модели.

В практике проектирования расчетные гидрографы иногда строятся таким образом, чтобы и пик и объем паводка отвечали заданной вероятности превышения. Такое допущение вытекает из того, что на крупных водотоках очень часто большому по объему паводку сопутствует высокий пик. При наблюдающемся соответствии величины пика и объема паводка, если это вызывается необходимостью решаемой задачи, пересчет ординат гидрографа-модели производится по коэффициенту  $K_2$ , а пик расчетного гидрографа доводится до величины  $Q_p$  с дорисовкой

гидрографа на гребне паводка при сохранении объема, равного  $W_p$ . При удачно выбранной модели дорисовка гидрографа не будет значительной, так как коэффициенты  $K_2$  и  $K_1$  окажутся близкими между собой.

Очень часто для расчетов выбирается не одна, а несколько моделей. В таких случаях выводы о влиянии регулирования на срезку паводка делаются по той модели, которая дает наиболее осторожное решение.

Гидрографы паводочной волны, используемые в расчетах регулирования, должны относиться к так называемому входному сечению, т. е. к сечению, расположенному в конце выклинивания подпора. Необходимость построения гидрографов во входном сечении, а не в выходном, где располагается плотина, вызывается тем, что первым отображается приток в водохранилище. в то время как вторым — приток, искаженный на русловую аккумуляцию в пределах затопленного подпором участка реки. Из-за этого пользование гидрографом в выходном сечении приводит к преувеличению эффекта регулирования, так как дважды учитывается распластывание паводочной волны — один раз в естественных условиях продвижения ее по руслу, другой — при работе водохранилища.

Если исходные гидрологические данные не обеспечивают построения гидрографов во входном сечении, эти гидрографы строятся путем ретрансформации гидрографов в выходном сечении. Указанная ретрансформация гидрографов заключается в решении уравнения неразрывности (баланса) на участке, ограниченном выходным и входным сечениями

$$Q_{вх} = Q_{вых} \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} - Q_{пр}, \quad (1.10)$$

где  $Q_{вх}$  — расход во входном сечении, средний за расчетный интервал времени  $\Delta t$ ;  $Q_{вых}$  — то же в выходном сечении;  $Q_{пр}$  — средний за тот же интервал времени расход притока с бокового водосбора;  $\Delta V$  — объем русловой аккумуляции.

Знак плюс соответствует подъему, знак минус — спаду паводка.

Для решения этого уравнения необходимо располагать кривыми расходов в ряде створов или водомерными наблюдениями в тех же створах, а также иметь морфометрические характеристики русла и поймы на исследуемом участке.

Схема упрощенного расчета ретрансформации заключается в следующем.

В соответствии с характером русла и поймы реки, а также с наличием кривых расходов или водомерных наблюдений все исследуемое протяжение делится на участки. Для этих участ-

ков подсчитываются и строятся объемные характеристики русла и поймы в зависимости от средних отметок на участках, т. е.  $V = f(Z_{\text{ср}})$ .

Далее гидрограф паводочной волны в выходном сечении разделяется на интервалы, для границ которых с гидрографа снимаются расходы (рис. 2.10 а). Зная закономерность изменения расходов вдоль потока, строятся графики продольного распределения расходов (рис. 2.10 б). По расходам, пользуясь кривыми

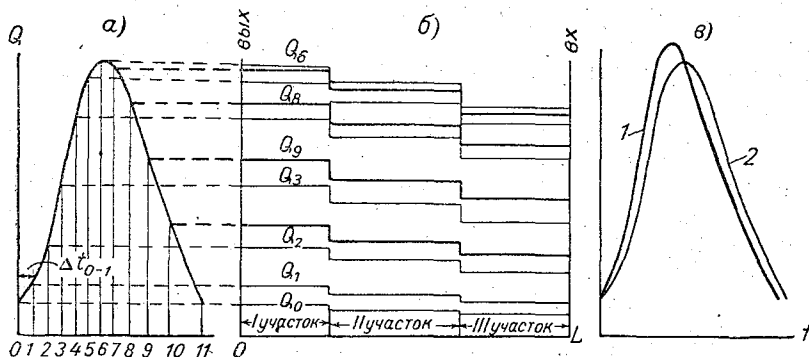


Рис. 2.10. Гидрограф в выходном сечении (а), график продольного распределения расходов (б) и гидрографы в выходном 1 и входном 2 (суммарного притока) сечениях (а).

$Q = f(Z)$ , находятся отметки уровней на границах участков, а по ним  $Z_{\text{ср}}$ . По этим отметкам с кривых  $V = f(Z_{\text{ср}})$  находятся русловые емкости, разности которых для смежных расходов дают русловую аккумуляцию в пределах того или иного интервала времени  $\Delta t$ . Суммированием русловой аккумуляции по всем участкам ( $\Delta V = \Delta V_I + \Delta V_{II} + \dots$ ) получаются величины  $\Delta V$ , входящие в выражение (1.10).

Расчитанный указанным способом гидрограф во входном сечении получается ступенчатым. Путем сглаживания ветвей подъема и спада с соблюдением равновеликой площади ему придаются плавные очертания. Этот гидрограф совместно с гидрографами притоков, впадающих в пределах водохранилища, и являются исходными в расчетах регулирования.

Если расчет регулирования ведется не по участкам, а сразу по всему водохранилищу, при ретрансформации гидрографа (1.10) можно не исключать расходы  $Q_{\text{пр}}$ . Тогда гидрограф во входном сечении будет характеризовать суммарный приток в водохранилище.

Окончательный вид гидрографа суммарного притока во входном сечении в сопоставлении с исходным гидрографом в вы-

ходном сечении приведен на рис. 2.10 в. Пик расходов во входном сечении выше, а форма гидрографа более острая по сравнению с гидрографом в выходном сечении.

#### § 4. ОБЩАЯ СХЕМА РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАВОДОЧНОГО СТОКА ПО СТАТИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

##### Отверстия для отвода воды из водохранилища

Отвод воды из водохранилища производится через отверстия, предназначенные для пропуска полезно используемых расходов, и через отверстия, сбрасывающие избыточную воду вхолостую.

Для сброса воды вхолостую, а также для сброса плавающих тел (льда, мусора и пр.) устраиваются специальные водосбросные отверстия. Водосбросные отверстия могут быть расположены в теле плотины, в теле других сооружений гидроузла, например гидроэлектростанции и в берегах реки. Применяются два типа водосбросов — с поверхностными и заглубленными отверстиями. В первом случае вода сбрасывается через гребень или порог в условиях потока со свободной поверхностью; во втором происходит истечение воды под напором, поскольку отверстия располагаются на какой-то глубине, иногда даже значительной. Поверхностные отверстия обычно называют водосливами, заглубленные — водоспусками.

Для закрытия отверстий применяются затворы, за исключением отдельных видов водосливов со свободным изливом.

Помимо упомянутых типов водосбросов, применяется особый вид их — сифонные водосбросы, работающие автоматически и не требующие каких-либо затворов.

Пропускную способность водослива определяют по общеизвестной формуле гидравлики

$$Q = m\sigma_n b \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}} n, \quad (2.10)$$

где  $m$  — коэффициент расхода, зависящий в основном от формы профиля водослива;  $\sigma_n$  — коэффициент затопления;  $b$  — длина водослива (одного пролета);  $H_0$  — напор на гребне водослива с учетом скорости подхода, т.е.  $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$ ;  $n$  — число пролетов.

Пропускную способность водоспуска определяют по формуле

$$Q = \mu\Omega \sqrt{2gH_0} n, \quad (3.10)$$

где  $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$ , а  $H$  — напор (разность уровней верхнего и нижнего бьефов, если выход отверстия затоплен, или глубина

воды над центром выходного сечения водоспуска, если оно не затоплено);  $\Omega$  — площадь водопрпускного отверстия;  $\mu$  — коэффициент расхода;  $n$  — число отверстий.

Подробные указания по расчету пропускной способности водосбросных отверстий и значения коэффициентов, входящих в формулы (2.10) и (3.10), можно найти в специальной литературе по гидравлике сооружений и, в частности, в работе [6].

Отметим лишь, что водосбросным отверстиям обычно придают более или менее стандартные размеры, определяющиеся габаритами освоенных промышленностью затворов. Например,

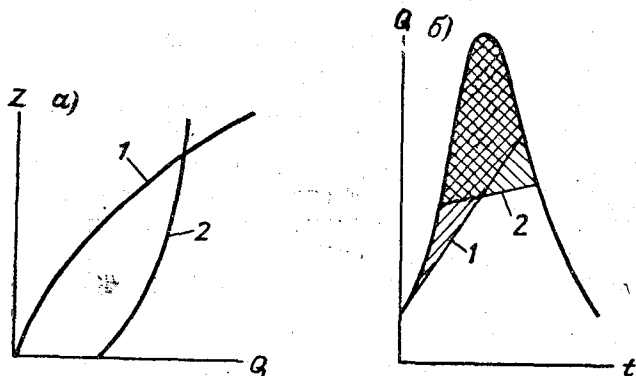


Рис. 3.10. Кривые пропускной способности водослива и водоспуска (а) и гидрографы естественных и сбросных расходов через водослив и водоспуск (б).

1 — водослив, 2 — водоспуск.

длина пролета водослива крупных гидроузлов обычно берется равной  $b = 18-20$  м, а высота  $H = 10$  м.

Общий вид зависимостей  $Q = f(Z)$  показан на рис. 3.10 а. Из рисунка видно, что пропускная способность водослива с повышением уровня водохранилища увеличивается значительно — от нуля при уровне на отметке гребня водослива до максимального расхода при высоком уровне. Пропускная же способность водоспуска изменяется мало с повышением уровня и достаточно высока при минимальном уровне, что обеспечивает большую срезку паводка по сравнению со срезкой при наличии водослива примерно одинакового размера, имея в виду одну и ту же емкость водохранилища (рис. 3.10 б). Такой характер рассматриваемых зависимостей объясняется тем, что с повышением уровня водохранилища на водосливе увеличивается сечение переливающегося слоя и расходы пропорциональны  $H_0^{3/2}$ , в то время как через водоспуск вода всегда идет полным сечением, а расходы пропорциональны  $H_0^{1/2}$ .

С водохозяйственной точки зрения более предпочтительны отверстия, обеспечивающие бóльшую срезку паводка, т. е. водоспуски. Однако ряд технических трудностей в эксплуатации затворов водоспусков, особенно при значительном заглублении отверстий под уровень водохранилища, нередко является препятствием для сооружения последних.

Окончательный выбор варианта водосбросных отверстий (водоспуск или водослив) должен служить предметом тщательного технико-экономического изучения.

### Расчеты регулирования

Для выполнения расчетов регулирования паводков необходимо иметь:

а) гидрографы во входном сечении и гидрографы боковой приточности (или суммарные гидрографы, отнесенные к входному сечению) заданной вероятности превышения;

б) кривые пропускной способности отверстий, отводящих из водохранилища воду, полезно используемую, и холостые сбросы;

в) кривые площадей зеркала и объемов водохранилища;

г) отметку уровня предпаводочной сработки водохранилища, отметки НПП и КПП;

д) указания о порядке пропуска паводков.

Предположим, что указаниями по пропуску паводков предусматривается работа водосбросных отверстий с полным их открытием уже при отметке предпаводочного уровня водохранилища  $Z_0$ . Тогда расчет нужно начинать с момента  $t_0$ , когда на подъеме паводка притекающий к водохранилищу расход равен пропускной способности всех отверстий при том же уровне  $Z_0$ .

В последующее время, поскольку нарастание приточных расходов происходит интенсивнее увеличения пропускной способности сбросных отверстий вследствие повышения уровня водохранилища, происходит аккумуляция избыточного стока. Аккумуляция продолжается до момента  $t_n$ , в котором притекающий расход уже на спаде паводка станет равным сбрасываемому (рис. 4.10 б). В момент  $t_n$  уровень водохранилища достигает своего наивысшего положения, а сбросной расход — максимального значения ( $\Sigma Q_m$  — см. далее).

Пропускная способность водосбросных отверстий первоначально задается приближенно, исходя из характера расчетного паводка и возможностей срезки его водохранилищем, при учете полезно используемых расходов. Как правило, в расчет трансформации паводков вводится несколько вариантов пропускной способности водосбросов, обычно различающихся между собой



количеством сооружаемых водосливных или водоспусковых отверстий. Окончательно принимается тот вариант, который удовлетворяет заданным условиям пропуска паводка: нормальный паводок проходит без превышения отметки НППГ, а катастрофический — при допустимой форсировке уровня.

Пусть будет задан гидрограф нормального паводка, пропускная способность водосбросных отверстий и кривые площадей зеркала и объемов водохранилища (рис. 4.10), а также предпаводочный уровень  $Z_0$  и отметка НППГ.

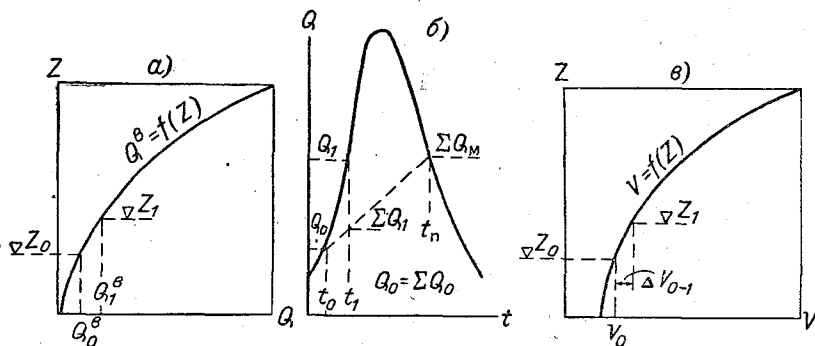


Рис. 4.10. Схема расчета пропуска паводка. Кривая пропускной способности водослива (а), гидрограф паводка (б) и кривая объемов водохранилища (в).

Примем следующие обозначения:

$Q_0^B$  — пропускная способность водосбросных отверстий при отметке водохранилища  $Z_0$ ;

$\Sigma Q_0$  — суммарный расход воды, отводимый из водохранилища в начальный момент времени  $t_0$  ( $\Sigma Q_0 = Q_0^B + Q_0^H$ , где  $Q_0^H$  — полезно используемый расход);

$Q_0$  — расход притока в начальный момент времени  $t_0$ . По условиям задачи  $Q_0 = \Sigma Q_0$ .

Аналогичные величины в момент времени  $t_1 = t_0 + \Delta t_{0-1}$  имеют индекс 1.

За интервал времени  $\Delta t_{0-1}$  баланс стока выразится разностью объемов притекающей и отводимой воды, т. е.

$$\Delta W_{0-1} = \left( \frac{Q_0 - Q_1}{2} - \frac{\Sigma Q_0 + \Sigma Q_1}{2} \right) \Delta t_{0-1}. \quad (4.10)$$

На величину  $\Delta W_{0-1}$  изменится наполнение водохранилища, которое в момент  $t_1$  должно дать уровень на отметке  $Z_1$ , обеспечивающий сброс расхода  $Q^1$ .

Так как в начале расчета отметка  $Z_1$  не известна, следовательно, не известен и расход  $Q_1^B$ , а отсюда и суммарный расход  $\Sigma Q_1$ . Поэтому задачу приходится решать подбором.

Первоначально задается конечная отметка уровня  $Z_1 = Z_0 + \Delta Z_{0-1}$ . По кривой пропускной способности водосбросных отверстий (рис. 4.10 а) при отметке  $Z_1$  находится расход  $Q_1^B$  или, что то же,  $\Sigma Q_1$ . Затем по уравнению (4.10) рассчитывается объем  $\Delta W_{0-1}$ . Далее проверяется соответствие заданного изменения уровня водохранилища  $\Delta Z_{0-1}$  с возможным по балансу стока путем сличения назначенного изменения наполнения водохранилища

$$\Delta V = \frac{1}{2} \Delta Z F_{0-1} \quad (5.10)$$

с объемом  $\Delta W_{0-1}$  по уравнению баланса (4.10).

В выражении (5.10)  $F_{0-1}$  — средняя площадь зеркала в интервале времени  $\Delta t_{0-1}$ , определяемая по кривой при среднем уровне водохранилища

$$Z_{0-1} = Z_0 + \frac{1}{2} \Delta Z_{0-1}. \quad (6.10)$$

При несоответствии объемов по (4.10) и (5.10) расчет повторяется при другом изменении уровня  $\Delta Z_{0-1}$ , пока не будет достигнуто соотношение  $\Delta W_{0-1} \cong \Delta V_{0-1}$ .

Закончив расчет за первый интервал  $\Delta t_{0-1}$ , переходят к расчетам за второй  $\Delta t_{1-2}$ , затем за третий  $\Delta t_{2-3}$  и т. д., пока не будет просчитан весь гидрограф до момента  $t_n$  (рис. 4.10).

Если конечный результат удовлетворяет поставленным требованиям, т. е. в конце паводка ( $t_n$ ) наивысший уровень оказывается на отметке НПГ, первый этап расчетов на этом заканчивается. В противном случае расчет повторяется при измененной пропускной способности водосбросных отверстий: в меньшую сторону, если уровень не достиг отметки НПГ, и в большую сторону, если уровень превысил ее.

Второй этап расчетов заключается в проверке достаточности полученной пропускной способности водосбросных отверстий пропуску катастрофического паводка при условии непревышения КПП. Эта проверка ведется по гидрографу соответствующей вероятности превышения и в той же последовательности, которая принята при расчетах нормального паводка.

Если форсировка уровня укладывается в допустимые пределы, полученная по условиям пропуска нормального паводка пропускная способность водосбросных отверстий окончательно принимается для данного сооружения. Если же форсировка уровня в чрезвычайных условиях оказалась больше допустимой,

Таблица 2.10

День	Расходы м <sup>3</sup> /сек						разность по графам 3—7
	Q	$\frac{Q_0 + Q_1}{2}$	Q <sup>в</sup>	Q <sup>н</sup>	ΣQ	$\frac{\Sigma Q_0 + \Sigma Q_1}{2}$	
1	2	3	4	5	6	7	8
0	11900	12700	150	1950	1950	2025	10675
1	13500	13950	300	1950	2100	2175	11775
2	14400	13200	500	1950	2250	2350	10850
3	12000	.....	.....	.....	.....	.....	.....

ΔW км <sup>3</sup>	V + ΔW км <sup>3</sup>	Z м	$Z_0 + \frac{1}{2} \Delta Z$ м	F км <sup>2</sup>	ΔZ м	ΔV км <sup>3</sup>
9	10	11	12	13	14	15
0,92	34,42	548,20	548,86	700	1,32	0,92
1,02	35,34	549,52	550,20	745	1,37	1,02
0,94	36,36	550,89	551,52	750	1,25	0,94
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

расчет повторяется, начиная на этот раз с пропуска катастрофического паводка (первый этап расчетов). Последующим расчетом (второй этап) устанавливается вероятность превышения паводка, отвечающего нормальным условиям эксплуатации сооружений, исходя из достижения в такой паводок уровня водохранилища на отметке НПГ.

В такой же последовательности ведутся расчеты и при проектировании сооружений I и II классов капитальности, поскольку нормами СН-2-57 в качестве исходных для расчета задаются чрезвычайные условия (см. табл. 1.10).

Расчет пропуска паводка ведется в форме табл. 2.10.

Схема расчета показана на рис. 4.10.

Если указаниями пункта д перечня необходимых исходных данных предусматривается иной режим пропуска паводков, когда, например, первоначально, открывается часть отверстий, а по достижении в водохранилище какого-то наперед заданного уровня  $Z_i$  количество работающих отверстий дополнительно увеличивается, в расчетах учитывается соответственно этот порядок открытия сбросных отверстий.

Рассмотренный в предыдущем примере режим пропуска паводка, предусматривающий полное открытие всех отверстий с наступлением больших расходов, обеспечивает наибольшую

срезку гребня волны паводка, так как в течение всего времени полностью используется пропускная способность водосброса. Однако такой порядок открытия отверстий возможно осуществить лишь при наличии хорошо поставленных прогнозов, так как ошибка в оценке паводка в сторону преувеличения приведет к недонаполнению водохранилища и, следовательно, к неполному удовлетворению интересов водопотребителей.

По этой причине в правилах эксплуатации водохранилищ предпочтение отдается последовательному открытию водосбросных отверстий по мере нарастания паводка. Хотя такой порядок открытия отверстий и приводит к некоторому увеличению пропускной способности водосбросных сооружений, зато он обеспечивает лучшее использование водохранилища и более надежную его работу на гарантированном режиме.

## § 5. СХЕМЫ УПРОЩЕННЫХ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАВОДОЧНОГО СТОКА

По Д. И. Кочерину

Выше был рассмотрен один из возможных путей расчета трансформации паводка, основанный на подборе размеров водосбросных отверстий. Путь этот довольно кропотлив и применяется при более или менее точных расчетах.

При приближенных же расчетах обычно применяется упрощенный прием, введенный в практику Д. И. Кочериным (1927 г.). Он основан на том, что графику сбросных расходов придается прямолинейное очертание от минимума в начале паводка до точки максимума. О величине погрешности, связанной с допущением о прямолинейности закона изменения сбросных расходов, можно судить по точности определения емкости водохранилища. Сравнение результатов при учете действительных очертаний графика сбросных расходов с прямолинейным показывает, что погрешность находится в пределах 5—10%. Это позволяет считать способ Кочерина вполне приемлемым на предварительных стадиях проектирования.

Д. И. Кочериным расчетные гидрографы представлялись в форме треугольников и трапеций. Обе формы гидрографов — треугольная и трапециевидальная — позволяют значительно упростить расчет трансформации паводка, сводя его к простейшим вычислениям по формулам. Указанные формулы дают возможность по известным элементам гидрографа и емкости водохранилища найти максимальный сбросной расход или, наоборот, по заданному максимальному сбросному расходу и известным элементам гидрографа найти величину требуемой емкости водохранилища.

**Треугольная форма гидрографа.** Пусть будет задан гидрограф треугольной формы (рис. 5.10 а). Элементами этого гидрографа являются величина пика  $Q_M$ , объем паводка  $W$  и длительность паводка  $T$ .

Определим емкость водохранилища, необходимую для регулирования паводка до максимального сбросного расхода  $Q_M^B$ .

Предполагая нарастание расходов, проходящих через отверстие по прямой, внутри треугольника притока с вершиной  $Q_M$  получим треугольник сбросных расходов с вершиной  $Q_M^B$ . Раз-

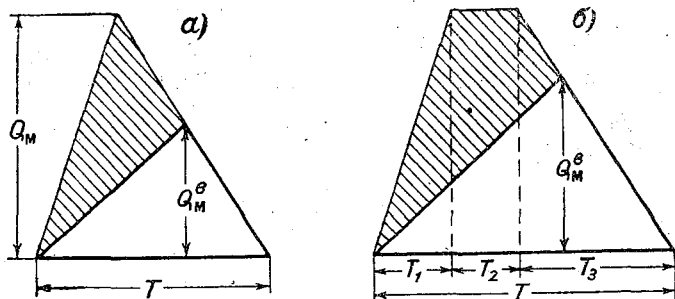


Рис. 5.10. Схема расчета пропуска паводка по Д. И. Кочерину при треугольной (а) и трапецидальной (б) формах гидрографа.

ность площадей треугольников и даст искомую емкость водохранилища

$$V = \frac{Q_M T}{2} - \frac{Q_M^B T}{2} = \frac{Q_M T}{2} \left( 1 - \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (7.10)$$

Так как  $\frac{Q_M T}{2} = W$ , то выражение (7.10) можно записать в таком виде

$$V = W \left( 1 - \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (7'.10)$$

Решая задачу в отношении максимального сбросного расхода, будем иметь

$$Q_M^B = Q_M \left( 1 - \frac{V}{W} \right). \quad (8.10)$$

**Трапецидальная форма гидрографа.** Элементами гидрографа трапецидальной формы также являются величина максимального расхода  $Q_M$ , объем паводка  $W$  и длительность паводка  $T$ . Общий период паводка складывается из периода подъема  $T_1$ , периода  $T_2$ , в течение которого удерживается максимальный расход, и периода спада  $T_3$ , т. е.  $T = T_1 + T_2 + T_3$ .

Предполагая и в этом случае нарастание сбросных расходов по прямой, внутри трапеции получим треугольник сбросных расходов (рис. 5.10 б). Разностью площадей трапеции и треугольника по-прежнему определится емкость водохранилища, если задан максимальный сбросной расход  $Q_M^B$

$$V = \left( \frac{Q_M T_1}{2} + Q_M T_2 + \frac{Q_M T_3}{2} \right) - \frac{Q_M^B T}{2} = \\ = \left( \frac{Q_M T}{2} + \frac{Q_M T_2}{2} \right) - \frac{Q_M^B T}{2} = \frac{Q_M T}{2} \left( 1 + \frac{T_2}{T} - \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (9.10)$$

Если задана емкость водохранилища, максимальный сбросной расход определится из выражения (9.10), как

$$Q_M^B = Q_M \left[ \left( 1 + \frac{T_2}{T} \right) \left( 1 - \frac{V}{W} \right) \right] = \frac{Q_M}{\eta} \left( 1 - \frac{V}{W} \right). \quad (10.10)$$

Выражения (7.10) и (9.10) можно заменить одним

$$V = W \left( 1 - \eta \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (11.10)$$

Здесь  $\eta = \frac{T}{T + T_2}$ .

Очевидно, что при треугольной форме приточного гидрографа  $T_2 = 0$  и  $\eta = 1$ . Таким образом, формулы (8.10) и (7.10) вытекают непосредственно из формул (10.10) и (11.10).

В расчетах по схеме Д. И. Кочерина предполагается, что из водохранилища вода отводится только через водосбросные отверстия. Если же, как обычно бывает, из водохранилища одновременно забирается и полезно используемый расход  $Q^H$ , в расчетах необходимо учесть и этот расход. Для этого достаточно шкалу расходов приподнять над основанием гидрографа на высоту, равную (в масштабе расходов)  $Q^H$ , соответственно пересчитать величины  $Q_M$ ,  $W$  и  $T$  и провести расчет, как указано выше.

Способ Кочерина можно распространить и на случаи с криволинейными очертаниями гидрографов притока. Однако такие гидрографы предварительно необходимо несколько схематизировать, придав им треугольную или трапецеидальную форму, находясь при этом в границах заданного объема паводка  $W$ .

### По другим авторам

В последующее время рядом авторов предложены формулы, в основе которых лежит та же схема расчета, использованная Д. И. Кочериным.

Например, Д. Л. Соколовский исходит из схематизации гидрографов притока и пропускаемых через водосбросное отверстие расходов по параболам и получает расчетную формулу для определения уменьшения максимального расхода за счет регулирования

$$r = \frac{Q_M^B}{Q_M} = k \left( 1 - \frac{V}{W} \right), \quad (12.10)$$

где

$$k = \frac{(1 + \gamma) f_1}{(1 + \gamma_1) f} \leq 1.$$

Здесь  $\gamma$  и  $\gamma_1$  — величины отношения продолжительности подъема и спада гидрографов притока и сбросных расходов;  $f$  и  $f_1$  — коэффициенты формы гидрографов притока и сбросных расходов, устанавливаемые в соответствии с работой [12].

При треугольной форме гидрографа притока и нарастании сбросных расходов по прямой коэффициент  $k = 1$  и, следовательно, из формулы (12.10) вытекает, как частный случай, формула (8.10).

По мнению В. Г. Андреянова, коэффициент  $k$  в первом приближении может приниматься равным 0,80.

Если сброс расходов будет регулироваться затворами, приведенные выше формулы неприменимы. Для этих более сложных случаев они были преобразованы В. И. Мокляком, И. А. Железняком, В. Н. Цингером и др. Эти уточнения расчетных формул излагаются в работе В. Н. Цингера [13].

Для расчета трансформации паводочного стока системой водохранилищ на малых реках также имеется ряд формул: Института гидрологии и гидротехники АН УССР, А. В. Огиевского, В. Н. Цингера, Я. Ф. Плешкова и др. Некоторые из этих формул, например Цингера и Плешкова, основаны на допущении совпадения естественных максимумов с частных водосборов со сбросными максимумами расходов из выше расположенных водохранилищ, что противоречит реальным условиям и приводит к преуменьшению эффекта регулирования.

Формулы И. А. Железняка [14] рассматривают частный случай, когда в бассейне создается одно водохранилище.

Упомянутыми формулами не учитывается всей сложности процессов формирования максимального стока, обусловленных наличием водохранилищ. Ими также не учитывается регулирующая роль русловой емкости на участках между водохранилищами. Поэтому расчеты по формулам могут привести к большим погрешностям, что следует иметь в виду при пользовании

ими. Путь решения задач трансформации паводочного стока, обеспечивающий наиболее высокую точность результатов, заключается в расчетах по гидрографам притока, поступающего в каждый бьеф, и гидравлическом анализе трансформации волны паводка водохранилищами (см. § 6, а также § 7).

#### § 6. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАВОДОЧНОГО СТОКА ПО ДИНАМИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

Задача расчетов регулирования паводочного стока по динамической емкости водохранилища сводится к совместному решению двух уравнений гидравлики — уравнения динамического равновесия и уравнения неразрывности.

Уравнением динамического равновесия определяются очертания свободной поверхности в каждый момент времени.

В речной гидравлике динамическое равновесие принято выражать уравнением

$$Q = K\sqrt{I}, \quad (13.10)$$

где  $K = C\omega\sqrt{H}$  — модуль расхода воды — пропускная способность русла.

Здесь  $I$  — уклон водной поверхности;  $H$  — средняя глубина (для широких речных русел она равна гидравлическому радиусу);  $\omega$  — площадь живого сечения;  $Q$  — расход воды;  $C$  — коэффициент, определяемый по одной из эмпирических формул Павловского, Маннинга и др. Пропускная способность русла, по возможности, должна определяться по данным непосредственных гидрометрических измерений.

Выражением (13.10) не учитываются инерционные члены динамического уравнения, характеризующие силы, возникающие в результате изменения скорости течения по длине потока и времени. Однако эти члены в применении к рассматриваемой задаче пренебрежимо малы.

Уравнением неразрывности характеризуется связь между объемами воды, поступающими в пределы рассматриваемого протяжения реки или водохранилища  $\Delta W_n$ , отводимыми из него  $\Delta W_o$  и аккумулируемыми в нем  $\Delta V$ .

Математически эта связь может быть выражена как

$$\Delta W_n - \Delta W_o = \Delta V. \quad (14.10)$$

При практическом решении задачи регулирования паводочного стока по динамической емкости водохранилища, так же как и при решении других задач неустановившегося режима, все протяжение водохранилища (водотока) разбивается на ряд участков, а расчетный гидрограф — на ряд элементарных отрез-



ков времени. Размеры участков и длительность расчетных интервалов времени принимаются такими, чтобы была возможна линейная интерполяция.

В начале гидравлического расчета считаются заданными два граничных условия: гидрограф во входном сечении расчетной вероятности превышения и гидрограф пропускаемых в нижний бьеф расходов. К исходным условиям расчета также относится и начальная отметка уровня водохранилища у плотины, а отсюда и кривая свободной поверхности в начальный момент времени расчета.

Вследствие того что одно граничное условие задается в самом верхнем (входном), а другое в самом нижнем (выходном) сечениях, расчет ведется последовательно, переходя от одного участка к другому. Выходное сечение верхнего по течению участка служит входным сечением ниже расположенного участка.

Расчет осуществляется подбором, задаваясь значениями неизвестных характеристик и проверяя соответствие их гидравлическим уравнениям. Правильность предварительно заданных характеристик, относящихся к выходному сечению (у плотины), проверяется после того, как будет просчитана вся гидравлическая цепь.

При расчете гидравлической цепи, относящейся к определенному моменту времени, уравнения динамического равновесия и неразрывности обычно решаются с помощью графических зависимостей, построенных для каждого участка.

Так как, согласно (13.10), расход воды в какой-либо момент

$$Q = K_{\text{ср}} \sqrt{\frac{\Delta Z}{\Delta S}},$$

первая из указанных зависимостей может быть представлена в форме номограммы  $Q = f(Z_{\text{вх}}, Z_{\text{вых}})$ .

Здесь  $K_{\text{ср}}$  — средняя пропускная способность участка, определяемая по заданным  $Z_{\text{вх}}$  и  $Z_{\text{вых}}$  по формуле

$$K_{\text{ср}} = \frac{K_{\text{вх}} K_{\text{вых}}}{\sqrt{\frac{1}{2} (K_{\text{вх}}^2 + K_{\text{вых}}^2)}}, \quad (15.10)$$

(где  $K_{\text{вх}}$  и  $K_{\text{вых}}$  — пропускная способность во входном и выходном сечениях);  $\Delta Z = Z_{\text{вх}} - Z_{\text{вых}}$  — разность между уровнями во входном и выходном сечениях;  $\Delta S$  — длина участка;  $\frac{\Delta Z}{\Delta S} = J_{\text{ср}}$  — характеризует средний уклон водной поверхности на участке.

Пример номограммы показан на рис. 6.10. Строится она по данным расчетов большого числа кривых свободной поверхности в условиях установившегося режима.

Вторая графическая зависимость представляется в форме  $V = f(Z_{\text{ср}})$  и выражает функциональную связь между объемами содержащейся в русле воды  $V$  и средним на участке уровнем  $Z_{\text{ср}}$  (полусумма уровней в начале и конце участка). Она строится по топографическим данным (см. гл. 4).

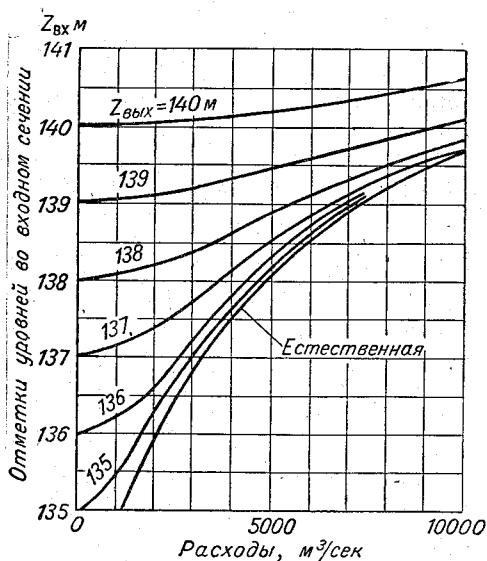


Рис. 6.10. Номограмма  $Q=f(Z_{\text{вх}}, Z_{\text{вых}})$ .

Основываясь на принятых обозначениях, уравнение динамического равновесия представляется в следующем виде:

для начального момента

$$\frac{Q_{\text{вх. нач}} + Q_{\text{вых. нач}}}{2} = K_{\text{нач}} \frac{\sqrt{Z_{\text{вх. нач}} - Z_{\text{вых. нач}}}}{\sqrt{\Delta S}}, \quad (16.10)$$

и для конечного момента

$$\frac{Q_{\text{вх. кон}} + Q_{\text{вых. кон}}}{2} = K_{\text{кон}} \frac{\sqrt{Z_{\text{вх. кон}} - Z_{\text{вых. кон}}}}{\sqrt{\Delta S}}. \quad (16'.10)$$

Здесь  $K_{\text{нач}}$  и  $K_{\text{кон}}$  характеризуют средние на участке пропускные способности, определяемые по формуле (15.10).

Аналогично этому уравнение неразрывности, первоначально записанное в форме выражения (14.10), может быть представлено в виде

$$\frac{Q_{\text{вх. нач}} + Q_{\text{вх. кон}} - (Q_{\text{вых. нач}} + Q_{\text{вых. кон}})}{2} \Delta t = V_{\text{кон}} - V_{\text{нач}}, \quad (17.10)$$

где  $\Delta t$  — расчетный интервал времени.

Приведенное показывает, что на протяжении каждого расчетного участка и каждого интервала времени неустановившийся режим характеризуется 8 элементами:  $Z_{\text{вх.нач}}$ ;  $Z_{\text{вых.нач}}$ ;  $Q_{\text{вх.нач}}$ ;  $Q_{\text{вых.нач}}$ ;  $Z_{\text{вх.кон}}$ ;  $Z_{\text{вых.кон}}$ ;  $Q_{\text{вх.кон}}$ ;  $Q_{\text{вых.кон}}$ .

Первые четыре элемента, относящиеся к начальному моменту времени, заданы начальными условиями расчета (конечные элементы для данного интервала времени являются начальными для следующего). Два других элемента, относящихся к конечному интервалу времени во входном сечении —  $Q_{\text{вх.кон}}$  и  $Z_{\text{вх.кон}}$ , заданы предыдущим расчетом (для самого верхнего участка они заданы граничными условиями во входном сечении).

Таким образом, из восьми элементов, которые входят в уравнения гидравлики неустановившегося режима, шесть определяются начальными условиями и предыдущим расчетом.

Остальные два элемента получаются в результате совместного решения уравнений динамического равновесия и неразрывности.

Расчет регулирования паводочного стока по динамической емкости водохранилища в том виде, как он изложен выше, довольно сложен и требует затраты значительного времени. Поэтому в практике применяются и другие методы, позволяющие систематизировать подбор решений, упрощающих процесс расчета [11], [12] и др.

## § 7. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ ВОПРОСЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАВОДОЧНОГО СТОКА

В рассмотренных задачах регулирования паводков предполагалось, что водохранилищем контролируется весь сток, которым определяется степень затопления ниже расположенных земель и различных объектов. В таких случаях величиной «срезанного» максимума и обусловливается затопление этих земель в зарегулированных условиях.

Нередки, однако, случаи, когда водохранилищем контролируется лишь часть стока, если плотина, образующая водохранилище, располагается выше впадения в регулируемый водоток каких-либо крупных притоков, а ценные в народнохозяйственном отношении земли и объекты располагаются ниже впадения этих притоков. Работа таких водохранилищ сильно усложняется, так как режим сбросов приходится подчинять не только условиям незатопления земель, располагающихся на участках между плотиной и впадением притоков, но и условиями незатопления земель на ниже расположенных участках. Чтобы решить подобную задачу, необходимо иметь по крайней мере два гидрографа: в створе плотины и с частного водосбора на участке между плотиной и так называемым «контрольным» створом, по расходам которого и оценивается степень затопления земель.

Как и в прежних случаях, при регулировании паводочного стока здесь как бы решаются две самостоятельные задачи: 1) устанавливаются пропускные способности водосбросных отверстий и 2) определяется величина потребной емкости водохранилища в связи с проблемой борьбы с наводнениями.

Для решения первой из указанных задач вероятность превышения расчетных гидрографов притока к водохранилищу принимается согласно указаниям СН 2-57 в соответствии с классом капитальности сооружений. Для решения второй задачи в расчет принимаются паводки более частой повторяемости.

В зависимости от характера и ценности объектов, ограждаемых регулированием от затоплений, вероятность превышения расчетных гидрографов обычно берется в пределах 1—20%. При этом больший процент отвечает условиям, когда ограждаются земли, используемые под сельскохозяйственное производство, а меньший — когда ограждаются городские строения, промышленные и транспортные объекты и т. п. Сравнительно частая повторяемость, принимаемая при регулировании паводков с целью ограждения сельскохозяйственных земель, может быть объяснена тем, что затопление этих земель и гибель посевов на них, происходящие не чаще чем один раз в 5 лет, в экономическом отношении является вполне оправданной. Добиваться же более редкой повторяемости затоплений, например один раз в 10 лет (обеспеченность 10%), менее выгодно, так как при этом значительно увеличивается емкость водохранилища и как следствие — его стоимость. Увеличение затрат по водохранилищу, как правило, не возмещается дополнительной продукцией от сельскохозяйственного производства вследствие более редкого затопления земель по сравнению, скажем, с затоплением один раз в 5 лет.

Так как в прохождении паводков наблюдается известная асинхронность, особенно в бассейнах с паводками дождевого и ливневого происхождения, в основном ввиду неполного охвата одновременным дождем всей площади водосбора при определении емкости водохранилища обычно исходят из такой схемы, когда приток в водохранилище и в контрольном створе отвечает расчетной вероятности превышения, а приток с частного водосбора равен разности величин стока в этих створах.

Пусть будут заданы гидрографы притока к водохранилищу и с частного водосбора (рис. 7, 10), а также величина расхода в контрольном створе  $Q_k$ , которую в условиях прохождения расчетного паводка, по возможности, нельзя превышать.

Пока сумма расходов  $\Sigma Q$  притока к водохранилищу  $Q_v$  и частного водосбора  $Q_6$  не превышает  $Q_k$ , т. е.

$$\Sigma Q = Q_v + Q_6 \leq Q_k, \quad (18.10)$$

наполнение водохранилища не производится.

С момента же, когда  $\Sigma Q > Q_k$ , начинается аккумуляция воды в водохранилище и по мере увеличения расхода с частного водосбора  $Q_6$  расход попуска  $Q$  постепенно уменьшается и доводится до величины

$$Q = Q_k - Q_6. \quad (19.10)$$

В пределе  $Q$  не должно быть меньше гарантированного расхода  $Q_p$ , которым удовлетворяются минимальные требования других отраслей народного хозяйства, т. е.

$$Q \geq Q_p. \quad (20.10)$$

Вследствие ограничения минимального попуска из водохранилища расходом  $Q_p$  в момент прохождения пика паводка с частного водосбора  $Q_{6m}$  зарегулированный расход в контрольном створе окажется равным заданному  $Q_k$  или будет больше его, если  $Q_{6m} + Q_p > Q_k$ . По достижении в контрольном створе максимального зарегулированного расхода  $\Sigma Q_m \geq Q_k$ , очевидно, не имеет смысла в последующее время прохождения паводка добиваться уменьшения  $\Sigma Q_m$ , так как с этим связана дополнительная аккумуляция стока в водохранилище и отсюда увеличение размеров его резервной емкости.

В этих условиях попуски из водохранилища после пика гидрографа с частного водосбора должны осуществляться расходами, обеспечивающими не превышение  $Q_{6m} + Q_p$  и равными

$$Q = (Q_{6m} + Q_p) - Q_6. \quad (21.10)$$

Аккумуляция воды в водохранилище, начавшаяся на подъеме паводка с момента, когда сумма расходов притока в водохранилище и с частного водосбора  $\Sigma Q > Q_k$ , заканчивается при наступлении на спаде паводка расхода притока  $Q_b = Q$ , найденного

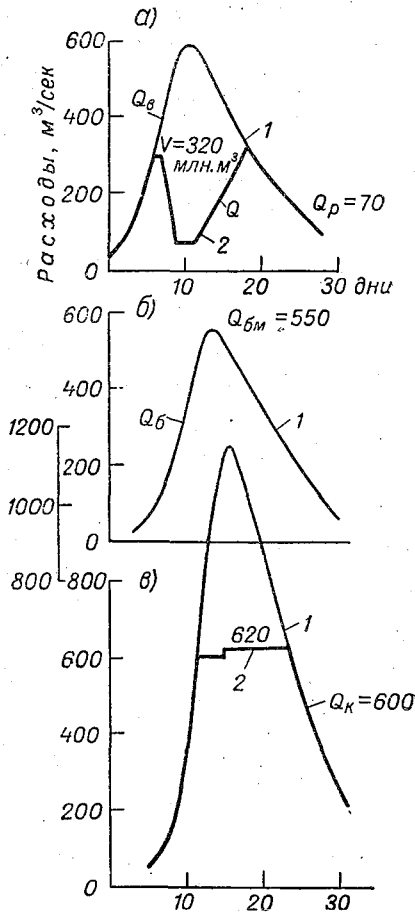


Рис. 7.10. Гидрографы расходов в створе плотины (а), с частного водосбора (б) и в контрольном створе (в). 1 — естественные расходы, 2 — зарегулированные расходы.

из выражения (21.10). Достигнутым наполнением и определяются потребные размеры водохранилища для зарегулирования расчетного паводка.

При расчете пропускных способностей водосбросных отверстий в рассматриваемых случаях и если требования в отношении обеспеченности паводка по СН 2-57 значительно отличаются от требований борьбы с наводнениями, зависимости (18—21.10) теряют практический смысл, так как условие о непревышении расхода  $Q_k$  все равно не может быть выдержано.

Ввиду удаления водохранилища и мест впадения крупных притоков от контрольного створа при расчетах регулирования паводков необходимо учитывать время добегания расходов воды до контрольного створа. Время добегания оценивается по средней скорости течения при паводочных расходах воды. В примере, показанном на рис. 7.10, время добегания от плотины до впадения основного притока составляет 3 дня и от притока до контрольного створа 2 дня.

Дополнительно к сказанному по поводу расчетов регулирования паводков, в случае когда водохранилище контролирует лишь часть стока, поступающего к контрольному створу, необходимо иметь в виду также и русловую аккумуляцию на пути до контрольного створа, несколько снижающую величины максимальных расходов, которую следует учитывать при оценке эффекта регулирования максимального стока.

#### Л и т е р а т у р а

1. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, Л., 1952.
2. Потапов М. В. Регулирование стока. Сочинения, т. III, Сельхозгиз, М., 1951.
3. Краткий справочник для гидрологических расчетов. Госэнергоиздат, М., 1948.
4. Рыбкин С. И. Номограммы для расчетов графиков криволинейного очертания. Гидротехническое строительство, № 7, 1940.
5. Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеиздат, Л., 1959.
6. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения, ч. I. Изд. литературы по строительству и архитектуре, 1954.
7. Кочерин Д. И. Вопросы инженерной гидрологии. НКП СССР — Энергоиздат, М., 1932.
8. Соколовский Д. Л. Гидрологические и водохозяйственные расчеты при проектировании малых ГЭС. Труды НИУ ГУГМС, сер. IV, вып. 36, 1946.
9. Цингер В. Н. Трансформация максимальных расходов водохранилищами. Труды ГГИ, вып. 52 (106), 1956.
10. Железняк И. А. Трансформация паводкового стока системой водохранилищ. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI, Гидрометеиздат, Л., 1959.
11. Архангельский В. А. Расчеты неустановившегося движения в открытых водотоках. Изд. АН СССР, 1947.

12. Гильденблат Я. Д. и Коренистов Д. В. Расчет режима речного водохранилища с учетом негоризонтальности водного зеркала. Труды Гидропроекта. Сб. 4, М., 1960.
13. Гильденблат Я. Д. Влияние Волжского каскада водохранилищ на режим половодий. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI, Гидрометеонздат, Л., 1959.
14. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. О распластывании волны высоких вод при продвижении по призматическому руслу. Сб. «Проблемы регулирования речного стока». Изд. АН СССР, вып. 6. 1956.

## ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

### КАСКАДНОЕ НЕЗАВИСИМОЕ И КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

#### § 1. КАСКАДНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ. СХЕМЫ КАСКАДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Стремительное развитие народного хозяйства СССР обусловило необходимость постройки на многих реках ряда установок и водохранилищ. Совокупность установок, последовательно расположенных ступенями вдоль течения какой-либо реки, носит название каскада установок. В настоящее время завершается постройка одного из наиболее крупных каскадов на р. Волге. Ведется строительство каскадов установок на Днепре, Иртыше, Каме, Ангаре, Ковде, Туломе и др. Построены каскады установок на Чирчике, Ниве, Свири, Вуоксе и др. Для примера на рис. 1.11 показан схематический продольный профиль верхнего и среднего участков Иртыша с указанием на нем установок каскада.

Условия работы каскадно расположенных установок отличаются от условий изолированно работающих установок.

Различие заключается в том, что каждая ниже расположенная установка использует сток, прошедший через выше расположенные установки и подвергшийся их воздействию. В результате, во-первых, суммарный используемый ими сток уменьшается вследствие изъятия воды на нужды различных отраслей народного хозяйства (водоснабжение, орошение и пр.) и потерь на испарение и, во-вторых, сток перераспределяется во времени.

Если из выше расположенных установок больших изъятий воды и потерь на испарение не имеет места, а сток перераспределяется значительно, влияние таких установок на ниже расположенные благоприятно. В этом случае условия работы ниже расположенных водохранилищ оказываются более легкими, так как в контролируемом ими стоке отражено влияние регулирования выше расположенными водохранилищами.



Степень влияния регулирования выше расположенных водохранилищ на ниже расположенные зависит как от соотношения полезных емкостей каждого из них, так и от соотношений величин стока: полного и с промежуточного (частного) водосбора между створами выше и ниже расположенных установок.

При энергетическом использовании водотока и если подпор ниже лежащей ступени распространяется до створа выше лежащей ступени, ниже лежащая оказывает влияние на напоры выше

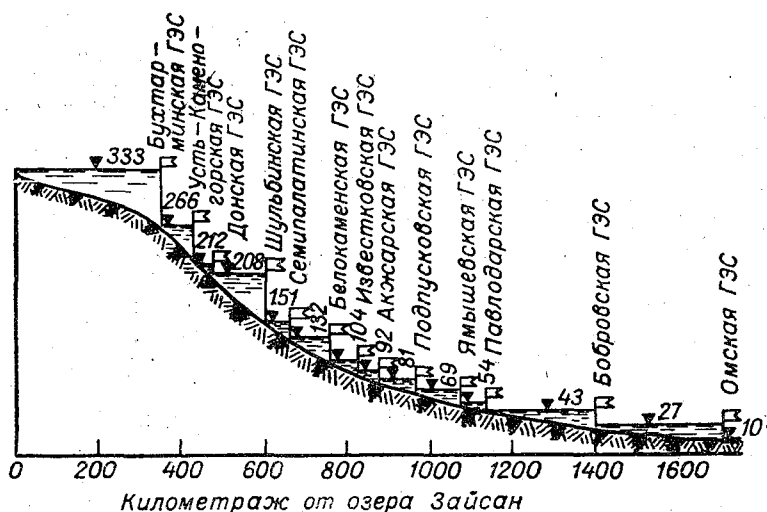


Рис. 1.11. Каскад установок на верхнем и среднем участках Иртыша.

лежащей ступени. Таким образом, при каскадном использовании в отношении регулирования стока выше расположенные ступени оказывают влияние на ниже расположенные, а в отношении напоров имеет место влияние ниже лежащих на выше лежащие установки.

В связи с взаимным влиянием работающих в каскаде установок определение их параметров и разработка режима эксплуатации должна вестись совместно.

Так как каскад установок может располагаться не только на основном водотоке, но и на его притоках, в проектах должно также учитываться взаимное влияние и установок на притоках. Примером схемы с установками на основной реке и на ее притоках может служить Волга с Камой. В настоящее время, как отмечалось в главе 1, на Каме уже работает Пермская ГЭС и строится Воткинская, водохранилища которых будут регулировать притекающий к ним сток, что отразится и на работе ниже

расположенных на Волге Волжской им. Ленина, Саратовской и Волжской ГЭС им. XXII съезда КПСС. В таком же положении окажутся и установки на Енисее, ниже впадения Ангары, на которые, помимо водохранилищ на самом Енисее выше впадения Ангары (Саянское, Красноярское и др.), будут оказывать регулирующее влияние и водохранилища на Ангаре (Иркутское, Братское и др.).

Различают два вида каскадного регулирования. Если каждая установка ведет регулирование на удовлетворение запросов непосредственно прикрепленных к ней потребителей, такое регулирование можно назвать *независимым*. Когда же установки ведут регулирование, подчиняя режим условиям работы других установок или всего каскада в целом, — *компенсирующим*. Компенсирующее регулирование наиболее часто применяется при работе каскадов гидроэлектростанций, поскольку задачей его является покрытие общего графика нагрузки энергосистемы. Однако нередко компенсирующее регулирование применяется и к каскаду, обеспечивающему потребителей водой.

Расчеты регулирования каскада установок, как правило, производятся по календарным гидрологическим рядам, так как сложное взаимодействие водохранилищ затрудняет анализ распределения вероятностей величин стока и наполнений водохранилищ. Поэтому обобщенные приемы водохозяйственных расчетов каскадов преимущественно применяются для приближенной оценки эффекта регулирования.

## **§ 2. РАСЧЕТЫ КАСКАДНОГО НЕЗАВИСИМОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО КАЛЕНДАРНЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЯДАМ**

При независимой работе установок каскада расчеты регулирования начинаются с самого верхнего по течению реки водохранилища и последовательно переносятся на каждую ниже лежащую установку. Таким последовательным расчетом учитывается суммарное влияние регулирования всеми выше расположенными водохранилищами на ниже расположенные, на которое затем накладывается регулирование собственным водохранилищем.

Для выполнения расчетов регулирования по календарным гидрологическим рядам необходимо иметь или интегральные кривые, или таблицы расходов в створах каждой установки каскада за расчетный период (годы). При этом как интегральные кривые, так и таблицы расходов должны характеризовать полные величины стока в створах рассматриваемых установок, т. е. со всей выше лежащей площади водосбора. При табличном способе расчета, кроме того, необходимо иметь величины расходов с частных водосборов по каждому водохранилищу.

Предположим, каскад состоит из трех установок. Водоохранилищем верхней контролируется сток, равный 37%, а средней —

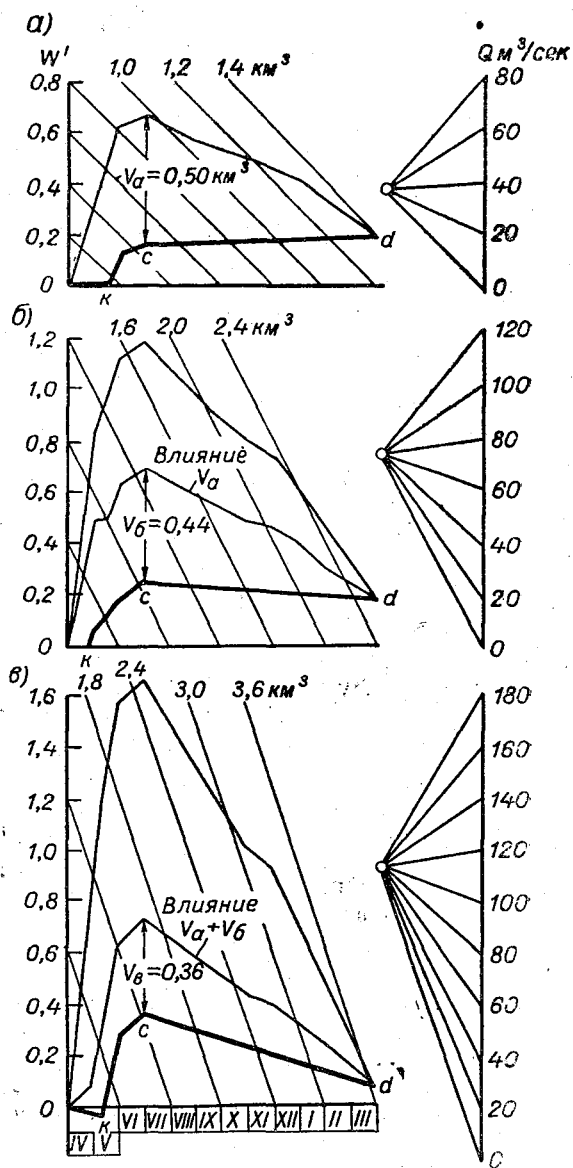


Рис. 2.11. Схема расчета каскадного независимого регулирования при трех водохранилищах.

69% стока в створе плотины нижнего водохранилища. Емкости водохранилищ позволяют осуществить сезонное регулирование стока.

На рис. 2.11 приведены интегральные кривые стока в створах верхней (а), средней (б) и нижней (в) плотин за расчетный маловодный год. Величины емкостей водохранилищ соответственно равны 0,50, 0,44 и 0,36 км<sup>3</sup>. Будем решать задачу регулирования по простейшей схеме — на постоянный расход.

Сначала расчет регулирования проводится на интегральной кривой притока к верхнему водохранилищу (а) при заданной емкости 0,50 км<sup>3</sup>. По маловодной части года определяется зарегулированный расход (линия *cd*), а затем по найденному расходу в многоводную часть года ведется наполнение водохранилища (линия *ок*). Далее линия зарегулированных расходов проводится параллельно естественной интегральной кривой до смыкания с точкой *с*. В точке *с* водохранилище начинает срабатываться, а заканчивается сработка в точке *д*. Линия *окcd* и выражает собой интегральную кривую зарегулированных расходов в створе плотины верхнего водохранилища.

Чтобы приступить к расчетам регулирования средним водохранилищем, необходимо на интегральной кривой (б), характеризующей расходы в естественном состоянии реки, отразить влияние работы верхнего водохранилища. Влияние выражается в том, что в определенные периоды часть стока оказывается задержанной в верхнем водохранилище и, следовательно, не поступившей к ниже лежащему среднему водохранилищу. Поэтому уменьшением ординат интегральной кривой естественного стока на объемах воды, содержащиеся в верхнем водохранилище, и будет получена интегральная кривая притока (б, линия  $V_a$ ) к среднему водохранилищу, учитывающая работу верхнего водохранилища (рис. 2.11 б). По исправленной таким образом интегральной кривой и ведется расчет регулирования средним водохранилищем. Этот расчет ничем не отличается от только что выполненного расчета по верхнему водохранилищу: по маловодной части года при заданной емкости 0,44 км<sup>3</sup> находится зарегулированный расход (линия *cd*), затем рассчитывается наполнение водохранилища (линия *ок*) и далее проводится линия до смыкания с точкой *с*, характеризующая работу водохранилища при заполненной емкости, т. е. на приточных расходах (линия *кс*).

Для выполнения расчетов регулирования нижним водохранилищем необходимо на интегральной кривой (в) естественного стока отразить суммарное влияние работы верхнего и среднего водохранилищ путем уменьшения ее ординат на объемы воды, содержащиеся в обоих выше лежащих водохранилищах. Далее по исправленной интегральной кривой (линия  $V_a + V_b$ ) и осуществляется расчет регулирования нижним водохранилищем: опре-

деляется при заданной емкости  $0,36 \text{ м}^3$  зарегулированный расход (линия *cd*), рассчитывается наполнение (линия *ok*) и т. п.

В изложенной выше последовательности ведутся расчеты регулирования и при наличии в каскаде большего числа водохранилищ.

При каскаде установок могут иметь место случаи, когда в результате работы выше расположенных водохранилищ даже с сезонным регулированием ниже расположенные водохранилища, несмотря на небольшие размеры своей емкости, в состоянии осуществлять многолетнее регулирование. В таком случае, когда одно или несколько водохранилищ ведут многолетнее регулирование, расчеты необходимо производить по гидрологическому периоду. Этот период должен отвечать требованиям, которые предъявляются к нему соответственно масштабам осуществляемого многолетнего регулирования.

В расчетах регулирования каскадно расположенных водохранилищ подлежит учету время добегания воды от одного створа к другому. Практический учет времени добегания сводится к тому, что, взяв за основу какой-то определенный створ, во всех других створах расходы за расчетный интервал времени (месяц, декада и т. д.) берутся в сдвинутых календарных границах. Например, если каскад состоит из трех установок и за основу взят створ нижней и если время добегания от верхней до средней установки равно 3 дням, а от средней до нижней — 5 дням, то при расчетах регулирования по среднедекадным значениям расходов декады надо брать, например, соответственно в таких границах: в створе верхней установки — с 13 по 22-е число, в створе средней — с 16 по 25-е и в створе нижней — с 21 по 30-е число месяца.

Последовательность расчетов каскадного независимого регулирования, изложенная применительно к графическому методу (интегральным кривым), сохраняется и при табличном расчете.

### § 3. ПРИЕМЫ ОБОБЩЕННЫХ РАСЧЕТОВ КАСКАДНОГО НЕЗАВИСИМОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Методов строгого обобщенного расчета каскадного независимого регулирования еще не разработано. Ниже излагаются приемы, позволяющие определить приближенные значения параметров многолетнего регулирования каскадно расположенных водохранилищ. Они основаны на применении тех же зависимостей между параметрами регулирования и стоком, которые используются при расчетах многолетнего регулирования изолированно работающих водохранилищ.

Степень влияния регулирования стока выше расположенных водохранилищ на водохозяйственные показатели нижерасположенных (обеспеченный минимум и среднюю величину отдачи) за-

висит, как мы уже отмечали, от ряда факторов и в первую очередь от соотношений между величинами стока с частных водосборов и емкостями водохранилищ.

Рассмотрим каскад, состоящий из двух водохранилищ, осуществляющих различную глубину многолетнего регулирования. При синхронном стоке с частных водосборов и при одинаковой обеспеченности отдачи водохранилище, обладающее более высокой относительной емкостью  $\beta$ , наполняется доверху лишь в периоды, когда менее емкое водохранилище также полно. Соответственно холостые сбросы воды из более емкого водохранилища происходят лишь в те периоды, когда менее емкое водохранилище также сбрасывает воду. Отсюда если большей относительной емкостью обладает верхнее водохранилище, то холостые сбросы не используются нижней установкой, поскольку в этот период низовое водохранилище само доверху наполнено и делает сбросы. В этом случае роль низового водохранилища сводится только к регулированию стока с частного водосбора. Когда же относительная емкость верхового водохранилища меньше, чем низового, холостой сброс из верхового водохранилища будет регулироваться низовым. Иначе говоря, часть емкости нижнего водохранилища как бы выделяется для регулирования стока с верхнего частного водосбора.

Соответственно намеченным соотношениям и ведутся расчеты регулирования. При этом расчеты верхового водохранилища в обоих случаях производятся точно так же, как если бы оно работало не в каскаде, а изолированно: по параметрам годового стока  $\overline{Q}_v$ ,  $C_v$  и  $C_s$  и заданной многолетней составляющей емкости водохранилища  $\beta_v$ , пользуясь графиками Плешкова или Иванова, или др., определяется коэффициент регулирования  $\alpha_v$  (или по заданному  $\alpha_v$  находится многолетняя составляющая емкости  $\beta_v$ ) и обычным путем — сезонная составляющая емкости, а по их сумме устанавливается полная полезная емкость  $V_v$ .

Расчеты низового водохранилища производятся в зависимости от роли верхового водохранилища, как это излагается ниже.

### **Верховое водохранилище обладает большей относительной емкостью**

Так как сток  $\overline{Q}_v$  верхового водохранилища используется и на низовой ступени, зарегулированный расход  $Q_p$  в ее створе как бы складывается из двух частей: из поступающего сверху  $Q_p^b$  (со степенью зарегулированности  $\alpha_v$ ) и расхода с частного водосбора зарегулированного низовым водохранилищем  $Q_p^h$  (со степенью зарегулированности  $\alpha_h$ ). Последний рассчитывается тем же путем, что и  $\alpha_v$ , но только по своей многолетней составляющей емкости водохранилища  $\beta_h$  и частному стоку  $\overline{Q}_h$ ,  $C_v$  и  $C_s$ . Полу-

ченные в результате самостоятельного расчета зарегулированные расходы из верхового и низового водохранилищ затем суммируются

$$Q_p = Q_p^B + Q_p^H = \alpha_B \bar{Q}_B + \alpha_H \bar{Q}_H. \quad (1.11)$$

### Верховое водохранилище обладает меньшей относительной емкостью

Когда  $\beta_B < \beta_H$ , нижнее водохранилище, как выше было отмечено, будет вовлекать в регулирование, помимо своего частного стока, и часть стока, поступающего с верхового водохранилища. В таком случае расчет низового водохранилища следует производить по суммарной емкости обоих водохранилищ — верхового и низового, т. е. по  $V_B + V_H$  и по суммарному стоку  $\bar{Q} = \bar{Q}_B + \bar{Q}_H$  и его параметрам  $C_v$  и  $C_s$ , используя те же зависимости, что и при расчете отдельных водохранилищ. Зарегулированный расход в низовом створе для этого случая составит

$$Q_p = \alpha \bar{Q}. \quad (2.11)$$

Приведенный выше расчет касался лишь вопроса определения гарантированной отдачи  $\alpha$  в низовом створе. Что касается полноты использования стока, характеризуемой коэффициентом  $\eta$ , то эта полнота как для верхней установки, так и для нижней при  $\beta_B < \beta_H$  определяется способом, изложенным в главе 9. При  $\beta_B > \beta_H$  для нахождения степени использования стока на низовой установке С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [1] рекомендуют следующие приближенные формулы, в которых пропускная способность водоподводящих устройств низовой установки  $q$  (турбин, насосов и т. д.) условно делится на части, использующие сток верхового  $q_B$  и низового  $q_H$  частных водосборов: для верхового водосбора

$$q_B = \frac{q(1 - \alpha_B) + \bar{Q}_H(\alpha_H - \alpha_B)}{\bar{Q}_H(1 - \alpha_H) + \bar{Q}_B(1 - \alpha_B)} \bar{Q}_B, \quad (3.11)$$

для низового водосбора

$$q_H = \frac{q(1 - \alpha_H) + \bar{Q}_B(\alpha_H - \alpha_B)}{\bar{Q}_H(1 - \alpha_H) + \bar{Q}_B(1 - \alpha_B)} \bar{Q}_H, \quad (4.11)$$

очевидно,  $q_B + q_H = q$ .

По величинам  $q_B$  и  $q_H$  определяются коэффициенты производительности  $\delta_B$  и  $\delta_H$  (см. [1]), характеризующие условия использования стока низовой установкой, поступающего с верхнего и нижнего частных водосборов. Далее по номограммам  $\eta = f(\alpha, \delta)$

определяются значения коэффициентов использования стока  $\eta_v$  и  $\eta_n$ , а по ним средние используемые расходы воды  $\overline{Q}_v$  и  $\overline{Q}_n$ . Сумма этих расходов и дает искомую среднюю многолетнюю величину расхода, используемого низовой установкой,

$$\eta \overline{Q} = \eta_v \overline{Q}_v + \eta_n \overline{Q}_n. \quad (5.11)$$

#### § 4. КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Схема регулирования, при которой каждое водохранилище обеспечивает определенный минимум отдачи для удовлетворения собственных потребителей (независимое регулирование), отвечает наибольшему эффекту регулирования на верховом водохранилище. Эта схема, однако, не обеспечивает наибольшего эффекта в отношении величин гарантированных расходов в створах нижних ступеней каскада.

Указанный наибольший эффект может быть получен лишь при наличии свободы маневрирования емкостями водохранилищ. Такая свобода предусматривает опорожнение в первую очередь низовых водохранилищ, так как это дает возможность задерживать избыточный сток с любой части водосбора и за счет этого увеличивать гарантированный минимум зарегулированных расходов на низовых створах. Впрочем при энергетическом использовании водотока, когда уровнями водохранилищ определяются напоры ГЭС, полная свобода маневрирования емкостями низовых водохранилищ может и не дать наибольшего эффекта. В подобных условиях этот эффект можно получить путем некоторого изменения последовательности сработки водохранилищ каскада. Целесообразная последовательность сработки водохранилищ находится специальным расчетом (см. § 7).

Режим регулирования, подчиненный интересам получения наибольшего зарегулированного расхода в низовых створах или наибольшей гарантированной мощности в целом по каскаду, и называют, как уже отмечалось, компенсирующим.

Простейшая схема компенсирующего регулирования будет представлена каскадом, состоящим из двух установок, причем только верхняя располагает емкостью, достаточной для регулирования стока, а нижняя лишь обеспечивает подачу воды потребителям.

Разделим сток, поступающий к створу нижней установки, на две части: с водосбора, контролируемого водохранилищем, и с промежуточного водосбора между створами верхней и нижней установок. Предположим, требуется в створе нижней установки обеспечить регулированием постоянный расход  $q$ . Тогда, используя в первую очередь сток с нерегулируемого водосбора, определим ту часть расхода  $q$ , которая не может быть покрыта



этим стоком. В каждый момент эта величина равна разности между  $q$  и нерегулируемым расходом. В моменты же, когда расходы с нерегулируемого водосбора превышают заданный расход потребления  $q$ , имеются избытки, которые пойдут в сброс. В период избыточного стока с нерегулируемого водосбора водохранилище аккумулирует притекающий к нему сток и наполняется, а в периоды недостатка — срабатывается, дополняя к расходам с промежуточного водосбора недостающую до заданного расхода  $q$  величину попуска.

Расчетную схему компенсирующего регулирования одним водохранилищем легко понять из рис. 3.11. Пусть гидрограф  $Q_A = f(T)$  характеризует полный сток в замыкающем створе нижней установки, а гидрограф  $Q_B = f(T)$ , построенный над расходом потребления  $q$ , — приток к водохранилищу. При  $Q_A > q$  имеются избытки, при  $Q_A < q$  — дефицит. Если полные избытки превышают приток к водохранилищу  $Q_B$  (например, в момент 1—1), имеют место сбросы, которые устранить невозможно, так как они формируются с неконтролируемой водохранилищем площади водосбора. В момент 2—2 избытки равны притоку к водохранилищу и, если оно к этому времени не будет заполнено, сбросы исключаются. С момента 3—3 начинается сработка водохранилища, которая ведется расходами, равными дефициту  $Q_d$ , а попуски из водохранилища  $Q$  равны сумме дефицита и расхода притока

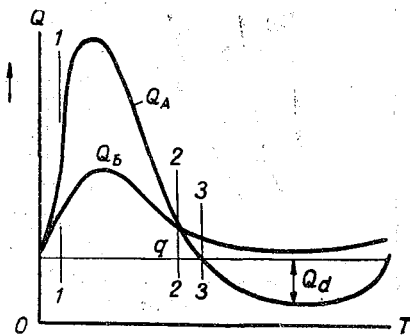


Рис. 3.11. Расчетная схема компенсирующего регулирования одним водохранилищем.

$$Q = Q_d + Q_B.$$

Режим работы водохранилища с полным прекращением попусков при избытках расходов с неконтролируемого водосбора обычно нельзя допускать, так как это приводит к обезвоживанию ниже лежащего участка реки. Если на этом участке производится водозабор на нужды водоснабжения, орошения или осуществляется водный транспорт и т. д., необходимо предусмотреть какой-то обязательный попуск. Минимальная величина этого попуска при отсутствии специальных требований со стороны упомянутых отраслей народного хозяйства определится санитарными условиями. Санитарный расход попуска обычно берется не

ниже минимального естественного расхода. На величину обязательного попуска будут увеличены непроизводительные сбросы в створе низовой установки.

В связи со значительными колебаниями расходов воды с неконтролируемого водосбора будут значительно колебаться и расходы попуска из водохранилища, снижаясь в многоводные периоды до минимального обязательного.

Для осуществления компенсирующего регулирования требуется емкость, превышающая ту, которая необходима для вы-

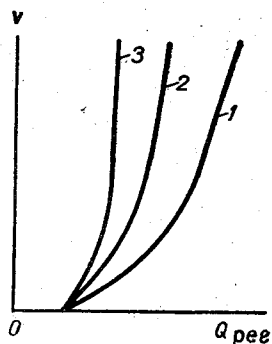


Рис. 4.11. Зависимость отдачи от емкости водохранилища.

1 — водохранилище низовой установки, 2 — водохранилище верховой установки, работающее по компенсирующему режиму, 3 — водохранилище верховой установки, регулирующее свой приток на постоянный расход.

равнивания собственного притока к водохранилищу. Различие в размерах требуемых емкостей в зависимости от местоположения и назначения водохранилища можно видеть на рис. 4.11 [1]. На рисунке даны кривые зависимости гарантированных расходов в низовом створе заданной обеспеченности от емкости водохранилища. Кривая 1 соответствует водохранилищу, контролирующему весь сток в низовом створе ( $Q_A$ ). При значительной емкости такое водохранилище в состоянии зарегулировать сток до среднемноголетнего расхода  $\bar{Q}_A$ . Кривая 2 отвечает схеме компенсирующего регулирования водохранилищем, контролирующим 30% стока в створе А. Такое водохранилище не в состоянии зарегулировать сток до среднемноголетнего расхода  $\bar{Q}_A$  даже при очень большой его емкости. Кривая 3 характеризует влияние водохранилища, контролирующего тот же

30%-ный сток, но работающего по схеме на выравнивание собственного притока  $Q_B$ . Наибольшая величина зарегулированного расхода в этом случае оказывается еще меньше, чем при компенсирующем регулировании. Все кривые начинаются в точке с минимальным естественным расходом в створе А. Расхождение кривых тем больше, чем меньшую часть стока по отношению к створу А контролирует водохранилище.

Следующим этапом на пути изучения компенсирующего регулирования явится рассмотрение случая, когда низовая установка также имеет возможность самостоятельно вести регулирование. В расчетном отношении этот случай оказывается более сложным (см. ниже). Однако общие принципы подхода к решению задачи компенсирующего регулирования при наличии двух и даже более водохранилищ остаются такими же, какие были изложены применительно к схеме с одним верховым водохранилищем.

## § 5. РАСЧЕТЫ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО КАЛЕНДАРНЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ РЯДАМ

В противоположность расчетам каскадного независимого регулирования расчеты компенсирующего регулирования начинаются с нижней установки, в которой задано потребление, и последовательно переносятся на выше расположенные.

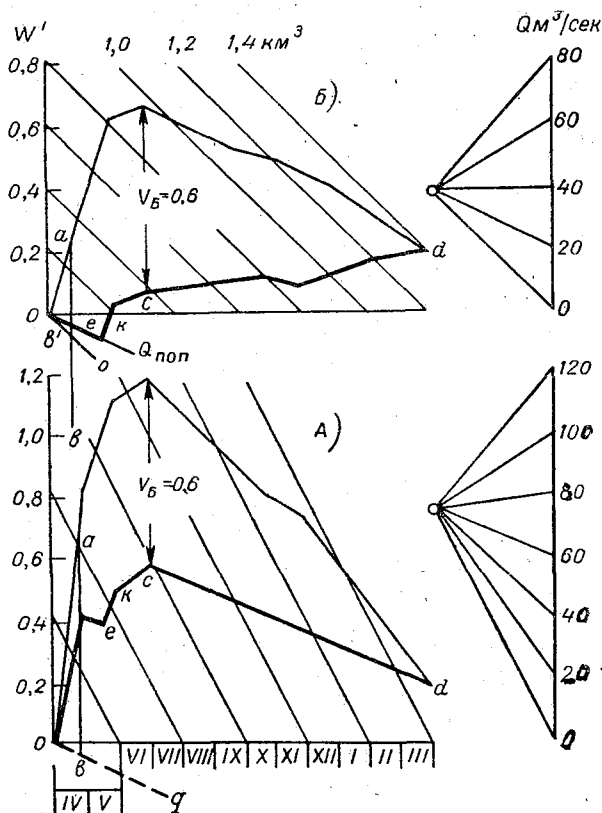


Рис. 5.11. Схема расчета компенсирующего регулирования одним водохранилищем.

Рассмотрим каскад, состоящий из двух установок, причем по-прежнему будем считать, что все регулирование (сезонное) сосредоточено в верхнем водохранилище, а нижняя установка лишь обеспечивает подачу воды потребителям. Водоохранилище контролирует сток, в среднем составляющий 53% стока в замыкающем створе нижней установки. Гидрологические характеристики заданы в виде интегральных кривых за расчетный мало-

водный год (рис. 5.11) в створах верховой (Б) и низовой установок (А) со всего выше лежащего водосбора.

Пусть будет задан расход  $q$ , который требуется обеспечить регулированием в створе низовой установки. С наклоном (по лучевому масштабу) расхода  $q$  на интегральной кривой А проводится касательная  $cd$  и по наибольшему расстоянию между нею и интегральной кривой определяется требуемая емкость водохранилища  $V$ . Так как по условиям задачи все регулирование сосредоточено на верховом водохранилище, проведенный расчет нужно перенести на интегральную кривую, характеризующую приток в водохранилище (Б). Это осуществляется путем переноса расстояний между интегральной кривой А и линией зарегулированного расхода  $q$ . Перенесенная на интегральную кривую Б линия  $cd$  характеризует расходы пусков из водохранилища в маловодную часть года. Как и следовало ожидать, вследствие неравномерности стока с неконтролируемого водосбора линия пусков оказывается ломаной. Вторая часть задачи — наполнение водохранилища — заключается в следующем. Продолжая расчет на интегральной кривой в створе низовой установки и проводя от начала ее линию того же расхода  $q$ , при переходе на интегральную кривую Б убеждаемся в невозможности поддержать в створе А заданный расход  $q$ . Это вытекает из того, что суммарные избытки  $av$  в створе А превышают объем максимальной аккумуляции стока в водохранилище  $av'$ , даже если сток из него будет полностью прекращен (линия  $Oo$ ). Такое положение обуславливается очень высоким стоком с неконтролируемого водосбора. Таким образом, ужим с самого начала половодья, когда водохранилище еще не заполнено, на низовом створе приходится делать холостые сбросы воды.

При указанных обстоятельствах для периода половодья необходимо расчет начинать с верхового створа, давая пуски в размере обязательного минимума  $Q_{\text{поп}}$ .

Затем вертикальные расстояния между интегральной кривой Б и линией расхода пуска из водохранилища  $Q_{\text{поп}}$ , характеризующие наполнения водохранилища на ряд моментов времени, переносят на интегральную кривую А и определяют ход зарегулированного стока в створе А.

Пуск  $Q_{\text{поп}}$  сохраняется до момента заполнения всей емкости (точка  $e$ ), если сток с нерегулируемого водосбора продолжает быть большим. Далее линии зарегулированных расходов как для верховой (Б), так и для низовой (А) установок идут параллельно основному интегральному кривым ( $ек$ ) до смыкания с точкой  $c$ , откуда начинается сработка водохранилища в маловодную часть года.

Если низовая установка также располагает емкостью водохранилища и ведет регулирование своего частного стока, последовательность расчетов не меняется. Разница заключается в том,

что найденная на интегральной кривой  $A$  по заданному расходу  $q$  емкость распределяется между двумя водохранилищами— $A$  и  $B$ .

Покажем на конкретном примере табличный расчет сезонного компенсирующего регулирования двумя водохранилищами на заданный расход в низовом створе, равный  $390 \text{ м}^3/\text{сек}$  (брутто).

Верховое водохранилище контролирует 43% полного стока в низовом створе. Частный сток низового водохранилища, следовательно, составляет 57%. Гидрологические данные представлены средними месячными расходами за расчетный маловодный 1920/21 г. Так как половодье начинается в середине апреля, расход этого месяца разделен на две половины, в первой из которых принят расход марта; расход второй половины установлен по остальной части стока апреля.

Расчет ведется с конца водохозяйственного года ходом назад (табл. 1.11). По разности между расходами полного притока к низовому створу (гр. 4) и заданным расходом  $390 \text{ м}^3/\text{сек}$  (гр. 5) определяются недостатки (дефициты, гр. 6). По недостаткам вычисляются объемы воды, заимствуемые из обоих водохранилищ (гр. 7), суммированием которых устанавливаются требуемые на конец расчетных интервалов запасы воды (наполнения) водохранилищ (гр. 8). Наибольшей величиной наполнения (в нашем примере  $4,51 \text{ км}^3$ ) определяется необходимая полезная емкость обоих водохранилищ.

Разделение емкости между верховым и низовым водохранилищами должно быть произведено на основе технико-экономических сопоставлений различных вариантов. Если в технико-экономическом отношении условия создания водохранилищ одинаковы, а также на предварительных стадиях проектирования, емкость можно разделить пропорционально контролируемому стоку — на верховое водохранилище 43%, или  $1,94 \text{ км}^3$ , и на низовое — 57%, или  $2,57 \text{ км}^3$ . В таком же соотношении могут быть разделены и требуемые запасы воды водохранилищ (гр. 9 и 10). Далее рассчитываются величины попусков (гр. 13) из верхового водохранилища по сумме приточных (гр. 2) и заимствуемых из него (гр. 12) расходов. В этих же графах ведется и расчет наполнения верхового водохранилища при учете заданного минимального пуска (в нашем примере  $120 \text{ м}^3/\text{сек}$ ). Расчет наполнения низового водохранилища выполнен в графах 7 и 8. Первоначально определены расходы притока к нему по сумме естественных расходов с частного водосбора (гр. 3) и попусков из верхового водохранилища (гр. 13, например, во 2-й половине апреля  $761 + 120 = 881 \text{ м}^3/\text{сек}$ ), исключением из которых зарегулированного расхода (гр. 5) найдены аккумуляруемые в низовом водохранилище расходы (гр. 6) и соответствующие им объемы (гр. 7). После наполнения водохранилищ до установленных пределов осуществляется переход на работу по притоку при доверху заполненных емкостях (см. табл. 1.11).

Таблица 1.11

Дата (расчетный интервал)	Расходы, м <sup>3</sup> /сек						Объемы воды, км <sup>3</sup>				Верхнее водохранилище		
	притока в створах			зарегулированные в низовом створе	недостаток (+) до зарегулированного или накопление (-) в низовом водохранилище	застываемый из водохранилища (+) или накопленный в низовом водохранилище (-)	наполнений водохранилищ на конец интервала			объем, застываемый (+) или накапливаемый (-) км <sup>3</sup>	расходы, м <sup>3</sup> /сек	застываемый (+) или накапливаемый (-) м <sup>3</sup>	попуск
	2	3	4				5	6	7				
				верховом	частный низовом	полный низовом							
1920 г.													
IV-2	196	761	955	390	491	0,65	0,10	0,65	0,10	0,10	76	120	
V	335	766	1101	390	496	1,30	0,66	1,95	0,56	0,56	215	120	
VI	604	585	1189	469	236	0,62	1,93	2,57	1,27	1,27	484	120	
VII	383	279	662	658	—	—	1,94	2,57	0,01	0,01	4	379	
VIII	198	197	395	395	—	—	1,94	2,57	—	—	—	198	
IX	111	154	265	390	125	0,33	1,80	2,38	-0,14	-0,14	-53	164	
X	89	162	251	390	139	0,37	1,64	2,17	0,16	0,16	61	150	
XI	78	83	161	390	229	0,60	1,38	1,83	0,26	0,26	99	177	
XII	55	65	120	390	270	0,71	1,07	1,43	0,31	0,31	118	173	
1921 г.													
I	50	62	112	390	278	0,73	0,76	1,01	0,31	0,31	118	168	
II	54	54	108	390	282	0,74	0,45	0,58	0,31	0,31	118	172	
III	67	62	129	390	261	0,69	0,15	0,19	0,30	0,30	114	171	
IV-1	67	62	129	390	261	0,34	0	0	0,15	0,15	114	171	

В изложенной последовательности выполняются графические и табличные расчеты компенсирующего сезонного регулирования и при большем числе водохранилищ, а также расчеты компенсирующего многолетнего регулирования стока при различном числе водохранилищ.

## § 6. РАСЧЕТЫ КОМПЕНСИРУЮЩЕГО МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОГО МЕТОДА

Г. П. ИВАНОВА

Сущность метода Г. П. Иванова заключается в том, что при введении нужных коррективов в параметры контролируемого водохранилищами стока, вытекающих из условий компенсирующего регулирования, расчет компенсирующего многолетнего регулирования возможно вести обычным путем, с применением обобщенных зависимостей.

Компенсирующее регулирование, как выше отмечалось, отличается от обычного тем, что, несмотря на полное задержание стока, контролируемого верховым водохранилищем, в отдельные годы вследствие ограниченной емкости низового водохранилища (или при отсутствии последнего) часть стока с ниже лежащего (частного) водосбора обращается в сбросы, в то время как верховое водохранилище оказывается еще не наполненным. Это равносильно тому, что регулирующее воздействие водохранилищ распространяется не на весь сток, поступающий к низовому створу, и, следовательно, для получения стока, участвующего в регулировании, необходимо естественный сток уменьшить на величины сбросов.

В дальнейшем для исправленного стока в низовом створе находятся соответствующие параметры — норма и коэффициенты изменчивости и асимметрии, которыми можно воспользоваться для расчетов регулирования по обобщенным зависимостям.

Разумеется, что в тех случаях, когда емкость низового водохранилища оказывается достаточной для практически полного регулирования стока с частного водосбора и сбросы при ненаполненном верховом водохранилище отсутствуют, будет иметь место обычного вида многолетнее регулирование. Вполне понятно, что расчет такого регулирования следует производить по полному естественному стоку в низовом створе без внесения коррективов (см. § 3).

Ниже излагаются основные положения метода Иванова. Более подробно с методом можно познакомиться по работам [4] и [5].

Метод Иванова исходит из общепринятого условного деления общей полезной емкости водохранилища при многолетнем регулировании на две ее составляющие части — многолетнюю и сезонную.

Рассмотрим каскад, состоящий из двух установок с водохранилищами при них. При этом емкость низового водохранилища достаточна лишь для осуществления неглубокого сезонного регулирования стока с частного водосбора.

### Определение многолетней составляющей и общей емкости обоих водохранилищ

Расчеты по определению многолетней составляющей емкости водохранилища производятся в следующем порядке:

а) по разности между расходами стока в створах сооружений верхового и низового подсчитываются средние месячные (или средние декадные) расходы стока с частного водосбора, если влиянием русловой аккумуляции можно пренебречь. Если влияние русловой аккумуляции на участке между верховой и низовой установками велико, характеристики стока с частного водосбора необходимо получить по данным о стоке впадающих здесь притоков или путем исключения русловой аккумуляции из расходов, полученных по разности;

б) задаваясь различными значениями гарантированной отдачи в низовом створе  $Q_{p_i}$ , определяются сбросы (избытки стока над потреблением и аккумуляцией в низовом водохранилище  $V_n$ ) из стока с частного водосбора для каждого месяца, года в отдельности и в среднем за многолетний период  $\Delta \bar{Q}_{n_i}$  (при определении сбросов подлежат учету обязательные попуски из верхового водохранилища — см. выше);

в) исключением из средних годовых расходов полного стока, поступающего к низовому створу, средних годовых расходов сбросов с частного водосбора находятся средние годовые расходы исправленного стока, по которым определяются новые параметры  $\bar{Q}'_i = \bar{Q} - \Delta \bar{Q}_{n_i}$  и  $C_{v_i}$ , соответствующие заданным значениям гарантированной отдачи  $Q_{p_i}$ ;

г) определяются коэффициенты регулирования по отношению к полному стоку, исправленному на сбросы с частного водосбора  $\alpha' = \frac{Q_{p_i}}{\bar{Q}'_i}$ ;

д) по установленным значениям коэффициента регулирования  $\alpha'_i$  и параметрам исправленного стока  $\bar{Q}'_i$  и  $C_{v_i}$  при заданной обеспеченности  $p$  обычным путем (по графикам Плешкова, графикам Иванова или по другим способам) определяются соответственные величины многолетней составляющей емкости водохранилища  $V_{мн_i}$ ;

е) определяются величины сезонной составляющей емкости водохранилища  $V_{сез_i}$  (см. ниже);



ж) суммированием многолетней  $V_{\text{ми}}$  и сезонной  $V_{\text{сез}}$ , составляющих определяются величины общей емкости водохранилища  $V_i$ . По этим данным строится кривая зависимости емкости  $V$  от отдачи  $Q_p$ , по которой и отыскивается отдача при заданной суммарной емкости обоих водохранилищ  $V = V_{\text{н}} + V_{\text{в}}$ ;

з) если заданными являются гарантированная отдача  $Q_p$ , обеспеченность  $p$  и емкость низового водохранилища  $V_{\text{н}}$ , а отыскивается емкость верхового водохранилища  $V_{\text{в}}$ , расчеты ограничиваются рассмотрением только одного варианта гарантированной отдачи  $Q_p$ , в результате чего будет найдена величина общей емкости водохранилища  $V = V_{\text{н}} + V_{\text{в}}$ .

Емкость верхового водохранилища при этом определится по разности  $V_{\text{в}} = V - V_{\text{н}}$ .

### Определение сезонной составляющей емкости обоих водохранилищ

Сезонная составляющая емкости обоих водохранилищ определяется по году со стоком, равным гарантированной отдаче. Эта емкость может быть определена графически или аналитически. Графически емкость определяется по интегральной кривой, построенной за водохозяйственный год по многолетним средним значениям месячных (или декадных) расходов суммарного стока в низовом створе, исправленных за счет сбросов с частного водосбора и за счет коэффициента уменьшения расходов притока к верховому водохранилищу  $\lambda_i$  (см. ниже) до такого предела, чтобы общая величина стока за год равнялась рассматриваемой гарантированной отдаче.

На построенной таким образом интегральной кривой строится линия гарантированного расхода в низовом створе (при постоянной в течение года отдаче — прямая, при переменной отдаче — ломаная), а затем по наибольшему отклонению интегральной кривой от линии расхода определяется сезонная емкость водохранилища. Аналитически величина сезонной емкости водохранилища определяется способами, изложенными в главе 6.

Указанный выше коэффициент уменьшения естественного притока в верховое водохранилище<sup>1</sup> равен отношению среднего расхода, исправленного на сбросы из этого водохранилища, к среднему естественному расходу в створе плотины, т. е.

$$\lambda_i = \frac{\bar{Q}_{B_i}}{\bar{Q}_B} = \frac{\bar{Q}_B - \Delta\bar{Q}_{B_i}}{\bar{Q}_B}. \quad (6.11)$$

Величина средних расходов сбросов из верхового водохранилища  $\Delta\bar{Q}_{B_i}$  определится по разности между средними расхо-

<sup>1</sup> Практически этот коэффициент представляет собой коэффициент использования стока в створе плотины верхового водохранилища.

дами суммарных сбросов  $\Delta\bar{Q}_i$  и сбросов с частного водосбора  $\Delta\bar{Q}_{н_i}$ , т. е. по выражению

$$\begin{aligned}\Delta\bar{Q}_{в_i} &= \Delta\bar{Q}_i - \Delta\bar{Q}_{н_i} = (\bar{Q} - \alpha_i\bar{Q}) - \Delta\bar{Q}_{н_i} = \\ &= (1 - \alpha_i)\bar{Q} - \Delta\bar{Q}_{н_i}.\end{aligned}\quad (7.11)$$

Если все регулирование стока будет сосредоточено на верховом водохранилище (низового водохранилища нет), сток с частного водосбора останется незарегулированным и сбросы увеличатся. В связи с этим эффект регулирования понизится. Емкость верхового водохранилища при этих условиях для получения одинаковой отдачи должна быть больше, чем суммарная емкость, при наличии также и низового водохранилища.

Получение высокого коэффициента регулирования стока в низовом створе при одном верховом водохранилище не всегда оказывается возможным, и степень приближения к желательному режиму зависит как от емкости водохранилища и доли контролируемого им стока по отношению к общей величине стока, так и от неравномерности стока с частного водосбора. Очевидно, предельной емкостью верхового водохранилища явится такой объем, при котором будет полностью зарегулирован весь контролируемый им сток, так как все сбросы окажутся сосредоточенными в стоке с частного водосбора (см. также § 4).

Порядок расчета компенсирующего многолетнего регулирования с одним водохранилищем остается тем же, что и с двумя водохранилищами. При этом, так как нередко приходится решать задачу при наперед заданных полезной емкости верхового водохранилища и обеспеченности  $p$ , в начале для произвольно назначенных значений отдачи  $\alpha_{p_i}$  определяется многолетняя  $V_{мн_i}$  и сезонная  $V_{сез_i}$  составляющие, а по сумме их — общая полезная емкость водохранилища  $V_i$ . По этим данным строится зависимость между отдачей и полной емкостью  $\alpha = f(V)$ , пользуясь которой и находится искомая отдача для заданной емкости водохранилища. Легко могут быть решены и другие аналогичные задачи, если, например, будут заданы  $\alpha$  и  $p$  и требуется определить необходимую емкость водохранилища  $V$  или если заданы  $\alpha$  и  $V$  и требуется определить  $p$ .

## § 7. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОМПЕНСИРУЮЩЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

### Предпосылки регулирования

Получившее в СССР широкое распространение объединение гидроэлектрических станций одного или нескольких водотоков совместно с тепловыми электростанциями в энергетические си-

стемы создает предпосылки для осуществления, помимо обычного (водохозяйственного) регулирования стока сооружаемыми на реках водохранилищами, электрического компенсирующего регулирования, которое заключается в том, что водохранилища ГЭС, обладающие большой энергоемкостью, коренным образом перераспределяют отдачу на регулируемых ими установках, приспособляя ее к неравномерной отдаче на слабо зарегулированных установках. За счет этого нерегулярно получаемая повышенная энергия на отдельных гидростанциях может быть использована в объединенной системе в качестве элемента гарантированной отдачи, что и приведет к значительному увеличению гарантированной мощности по системе в целом по сравнению с минимальным значением суммарной мощности при регулировании на выравнивание мощности каждой отдельной ГЭС. Увеличится также и общая энергоотдача системы.

Указанное повышение отдачи достигается путем накапливания стока (энергии) в энергоемких водохранилищах в периоды повышенной отдачи на слабо зарегулированных ГЭС и усиленной сработки накопленных запасов воды (энергии) в периоды низкой отдачи на последних. Повышенная энергоотдача в одни периоды на одних установках и в другие периоды на других установках реализуется в энергосистемах при помощи передачи электрической энергии по высоковольтным линиям связи.

Эффект электрического компенсирующего регулирования зависит также и от гидрологического режима используемых водотоков. При асинхронности стока вследствие одновременного наступления периодов высокой и низкой водности на разных реках будет иметь место естественная взаимная компенсация стока. Под влиянием этого проведение компенсирующего регулирования облегчается и при прочих одинаковых условиях эффект электрического компенсирующего регулирования становится более высоким.

Характерным примером электрического компенсирующего регулирования является Кольская энергетическая система (Северо-Запад ЕТС), объединяющая Нижне-Тулумскую ГЭС, каскад ГЭС на р. Паз, каскад ГЭС на р. Ниве и др. В этой системе широкое компенсирующее регулирование ведет каскад ГЭС на р. Ниве, в голове которого расположено огромное (по масштабам энергосистемы) водохранилище, образованное на оз. Имандра. Энергетический эквивалент его емкости весьма значителен. Приспосабливаясь к неравномерной отдаче Нижне-Тулумской ГЭС, работающей на естественном стоке р. Туломы, ГЭС на р. Паз, сток которой слабо зарегулирован водохранилищем на оз. Инари, и других ГЭС, каскад ГЭС на р. Ниве значительно повышает гарантированную (рис. 6.11) и общую энергоотдачу Кольской энергосистемы [6].

В качестве другого примера электрического компенсирующего

шего регулирования можно назвать энергосистему, объединяющую гидростанции на Енисее и Ангаре [7]. Гидрологические особенности этих рек чрезвычайно благоприятны для получения высокого энергетического эффекта при проведении электрического компенсирующего регулирования.

Сток Енисея характеризуется очень большой внутригодовой неравномерностью. Основная часть годового стока у Красноярска (до 70%) приходится на четыре весенне-летних месяца

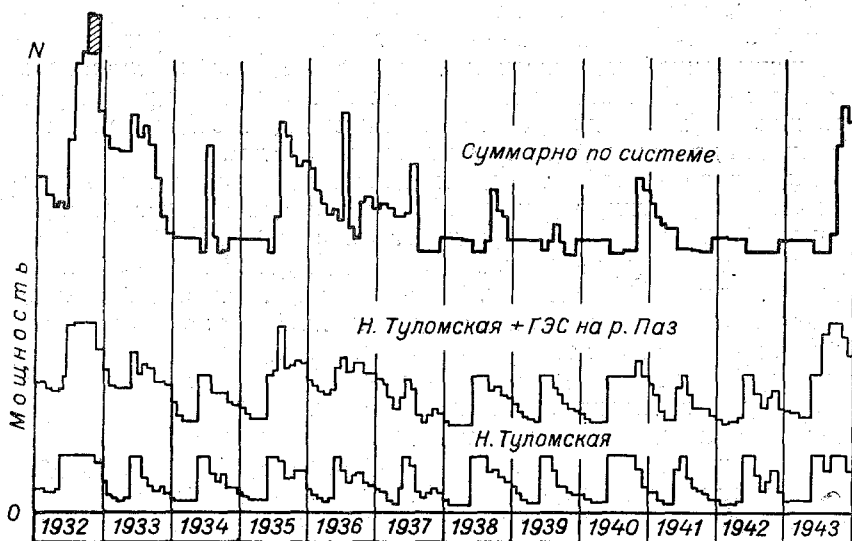


Рис. 6.11. Графики мощностей гидроэлектростанций Кольской энергосистемы.

(май — август), 23% стока проходит осенью и только 7% — зимой. Сток же р. Ангары благодаря регулируемому воздействию оз. Байкал хорошо выравнен на протяжении всего года. Многолетние колебания годового стока как на Енисее, так и на Ангаре незначительны и характеризуются низкими коэффициентами изменчивости (0,14—0,12). В хронологической последовательности чередования лет различной водности наблюдается существенное различие. В то время как на Енисее маловодные периоды длятся 2—3 года, на Ангаре они продолжаются до 10 лет. По времени маловодья не совпадают.

Существенное различие в гидрологическом режиме Енисея и Ангары обуславливает естественную компенсацию стока и это уже одно предопределяет целесообразность объединения ГЭС в единую энергосистему. Благоприятным для совместной работы ГЭС являются также и чисто водохозяйственные факторы —

различные возможности регулирования стока. Первоочередная на Енисее Красноярская ГЭС располагает лишь водохранилищем сезонного регулирования, в то время как Братская ГЭС на Ангаре — водохранилищем глубокого многолетнего регулирования. Последнее и будет вести электрическое компенсирующее регулирование в объединенной системе, за счет чего значительно увеличится ее суммарная гарантированная мощность. На последующем этапе использования рек, когда будет построена на Енисее Саянская ГЭС, а на Ангаре — Усть-Илимская ГЭС, Братская ГЭС совместно с Усть-Илимской явятся компенсатором по отношению к Красноярской и другим ГЭС на Енисее.

Осуществление электрического компенсирующего регулирования увеличит гарантированную мощность в системе Красноярской и Братской ГЭС, например, на 455 тыс. кВт, или на 12% по сравнению с их суммарной минимальной мощностью при независимом режиме работы. Это весьма большой выигрыш в народном хозяйстве страны.

Задачи электрического компенсирующего регулирования, так же как и задачи компенсирующего регулирования стока, решаются по тем же гидрологическим рядам или на основе применения обобщенных методов и зависимостей. Для этого вместо величин расходов воды и емкостей водохранилищ в расчеты вводятся соответствующие их эквиваленты — мощности и выработка энергии. Из обобщенных применяется изложенный выше (см. § 6) метод Г. П. Иванова, а также метод П. В. Стельмаха [8].

### Схема расчета

Не имея возможности подробно рассматривать методику расчета электрического компенсирующего регулирования, ниже даем лишь примерную схему расчета на конкретном материале.

Работают три каскадно расположенные ГЭС: Верхняя, Средняя и Нижняя. Каждая из них обладает водохранилищем. Основные данные, характеризующие водоток, водохранилища и ГЭС помещены в табл. 2.11.

В соответствии с возможностями регулирования на Верхнее водохранилище возложены функции компенсатора в энергосистеме. С точки зрения получения наибольшей выработки энергии от каскада ГЭС целесообразно поддерживать более высокие горизонты воды в водохранилищах средней и нижней ступеней, так как на этих ступенях используется больший на величину частной приточности сток и получается большая выработка энергии на транзитном (с верховой установки) стоке, вследствие того что потери напора в нижнем бьефе выше лежащей ГЭС из-за повышения горизонта воды на нижней ступени меньше приращения напора на ГЭС ниже лежащей.

Таблица 2.11

ГЭС	Средний годово- вой сток, км <sup>3</sup>		Емкость водохранилища			Напор (сред- ний), м	Энергети- ческий экви- валент ем- кости, мгвт-мес
	полный	частный	км <sup>3</sup>	в долях от годового стока			
				пол- ного	част- ного		
Верхняя . . . . .	4,08	4,08	6,60	1,62	1,62	33,4	2200
Средняя . . . . .	6,40	2,32	0,54	0,08	0,23	34,0	123
Нижняя . . . . .	8,40	2,00	1,90	0,23	0,96	36,6	224

В то же время чем меньше ежегодная сработка водохранилищ ниже лежащих ГЭС, тем большие потери воды возможны на холостые сбросы. Однако ввиду сравнительно высокой степени регулирования стока на всех установках (см. табл. 2.11) этот вопрос имеет меньшее значение, чем повышение напора.

Учитывая изложенное, ежегодная сработка Среднего и Нижнего водохранилищ намечается лишь в той мере, в какой это требуется для зарегулирования притока с частного водосбора в маловодном году. Остальная часть емкости каждого из этих водохранилищ используется для многолетнего регулирования и срабатывается только по исчерпанию всего полезного объема водохранилища Верхней ГЭС. Наполнение же Среднего и Нижнего водохранилищ осуществляется в первую очередь.

Расчеты регулирования<sup>1</sup> выполнялись в такой последовательности (табл. 3.11 — рассмотрен один водохозяйственный год). В первую очередь регулируется мощность Нижней ГЭС собственным водохранилищем по частному стоку с водосбора ниже Средней ГЭС (гр. 4). Во вторую очередь регулируется мощность Средней и Нижней ГЭС водохранилищем Средней ГЭС по частному стоку с водосбора между Верхней и Средней ГЭС (гр. 8, 18 и 19).

Для обоих расчетов строятся диспетчерские графики в координатах: мощность — энергия наполнения водохранилища. Емкости диспетчерского наполнения Нижнего и Среднего водохранилищ на первые числа каждого месяца приняты по данным расчетов регулирования мощностей по частному стоку в маловод-

<sup>1</sup> С целью упрощения вычислительной работы выработка энергии принимается в *мгвт-месяцах* (тыс. *квт-месяцах*), т. е. выражается мощностью. Для перехода к обычному выражению в тыс. *квт-ч* достаточно умножить приводимые цифры на среднее число часов в месяце (730,5).

ном году с принятой обеспеченностью. Использование избытков планируется в течение двух последующих месяцев (см. гл. 7).

С помощью диспетчерских графиков производятся расчеты регулирования по имеющемуся календарному ряду. Затем зарегулированные средние месячные мощности Нижней и Средней ГЭС по притоку с частного водосбора суммируются с незарегулированными (гр. 13) средними месячными мощностями по притоку в Верхнее водохранилище на напоре всех трех ГЭС каскада ( в табл. 3.11 эти суммы не приводятся).

По полученным суммарным величинам мощностей обобщенными методами (см. выше) или путем построения обычной интегральной кривой выработки энергии и регулирования по ней при заданной емкости верхового водохранилища, выраженной в энергетическом эквиваленте на напоре трех ГЭС, определяется суммарная гарантированная мощность каскада при компенсирующем регулировании (гр. 2).

Если бы в энергосистему входили также и гидростанции на других водотоках, не имеющих регулирования или имеющих регулирование, к указанным суммам следовало бы добавить мощности по естественным или зарегулированным расходам последних. Таким образом, для определения гарантированной мощности в энергосистеме при компенсирующем регулировании необходимо иметь за календарный гидрологический ряд суммы мощностей по ГЭС: а) работающим на незарегулированных водотоках — по естественным расходам; б) работающим на зарегулированных водотоках, но не ведущим компенсирующего регулирования — по зарегулированным расходам; в) ведущим компенсирующее регулирование — по естественным расходам.

Необходимо иметь в виду, что при подсчете мощностей в группах ГЭС, работающих на незарегулированных или на зарегулированных водотоках (ГЭС а и б), вводятся ограничения по установленной мощности.

Дальнейший расчет в табл. 3.11 сводится к определению наполнений — срабатывания Нижнего (гр. 3, 5 и 6) и Среднего водохранилищ (гр. 7, 9, и 10), вычислению регулируемой мощности всех ГЭС (гр. 12) на стоке Верхнего водохранилища (по разности между гр. 2 и суммой граф 4 и 8), разделению этой мощности по отдельным ГЭС (пропорционально напорам — гр. 15 и 17), определению полных мощностей Средней и Нижней ГЭС (гр. 20 и 21) и, наконец, вычислению наполнений — срабатывания Верхнего водохранилища (гр. 11 и 14).

### **Последовательность сработки водохранилищ**

В современных условиях вопрос о целесообразной последовательности сработки водохранилищ, работающих в одной энергетической системе, приобретает весьма важное значение и ему в последнее время уделяется большое внимание.

### СХЕМА РАСЧЕТА КОМПЕНСИРУЮЩЕГО РЕГУЛИРО

Месяц	Суммарная регулирующая мощность, <i>Мгвт-мес</i>	Энергия наполнения Нижнего водохранилища, <i>Мгвт-мес</i>	Регулируемая мощность Нижней ГЭС на частном притоке, <i>Мгвт</i>	Энергия частного притока в Нижнем водохранилище, <i>Мгвт-мес</i>	Аккумуляция энергии частного притока в Нижнем водохранилище, <i>Мгвт-мес</i> (5—4)	Энергия наполнения Среднего водохранилища, <i>Мгвт-мес</i>	Регулирующая мощность Нижней и Средней ГЭС на частном притоке в Среднем водохранилище, <i>Мгвт</i>	Энергия частного притока в Среднем водохранилище на напоре Средней и Нижней ГЭС, <i>Мгвт-мес</i>	Аккумуляция энергии частного притока в Среднем водохранилище, <i>Мгвт-мес</i> (9—8)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

1925/26 г.

V	156	196,6	11,3	36,2	24,9	62,6	60,6	121,0	60,4
VI	171	221,5	30,9	33,4	2,5	123,0	84,0	84,0	0,0
VII	156	224,0	13,9	13,8	-0,1	123,0	55,7	55,7	0,0
VIII	156	223,9	14,3	14,4	0,1	123,0	36,4	36,4	0,0
IX	156	224,0	13,4	13,4	0,0	123,0	33,7	33,7	0,0
X	156	224,0	16,5	16,5	0,0	123,0	34,0	28,9	-5,11
XI	162	224,0	13,9	11,3	-2,6	117,9	34,5	27,5	-7,0
XII	162	221,4	13,6	8,26	-5,34	110,9	33,0	9,64	-23,36
I	162	216,1	12,7	7,04	-5,66	87,54	26,5	11,2	-15,3
II	162	210,4	12,2	5,81	-6,39	72,24	25,0	8,03	-16,97
III	162	204,0	11,4	8,56	-2,86	55,27	25,0	9,64	-15,36
IV	162	201,1	12,6	5,51	-7,09	39,91	25,0	10,1	-14,9
Сумма	1923								
Среднее	160,2								

Условные обозначения:  $\Sigma H$  — суммарный напор трех ГЭС.  $H_B$  — напор

Примечания. 1. Наполнения водохранилищ даны на конец месяца.

2. По требованию энергосистемы средняя годовая летние месяцы (V—X) — 156 *Мгвт* и на зимние невозможности зарегулировать энергию частного



## БАНИЯ МОЩНОСТИ КАСКАДА 3-х ГЭС

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Энергия наполнения Верхнего водохранилища, <i>мгвт-мес</i>	Регулирующая мощность Верхней, Средней и Нижней ГЭС на стоке из Верхнего водохранилища, <i>мгвт</i> [2—(4+8)]	Энергия притока в Верхнее водохранилище, <i>мгвт-мес</i>	Аккумуляция энергии в Верхнем водохранилище, <i>мгвт-мес</i> (13—12)	Мощность Верхней ГЭС, <i>мгвт</i> $\left(\frac{H_B}{\Sigma H} \times 12\right)$	Мощность Средней ГЭС на стоке из Верхнего водохранилища, <i>мгвт</i> $\left(\frac{H_{Cp}}{\Sigma H} \times 12\right)$	Мощность Нижней ГЭС на стоке из Верхнего водохранилища, <i>мгвт</i> [12—(15+16)]	Мощность Средней ГЭС на частном притоке, <i>мгвт</i> $\left(\frac{H_{Cp}}{\Sigma H - H_B} \times 8\right)$	Мощность Нижней ГЭС на частном притоке в Среднем водохранилище, <i>мгвт</i> (8—17)	Мощность Средней ГЭС, <i>мгвт</i> (16+18)	Мощность Нижней ГЭС, <i>мгвт</i> (4+17+19)

647,4	84,1	224,0	139,9	27,2	27,7	29,2	29,4	31,2	57,1	71,7
727,3	56,0	195,0	139,0	18,1	18,4	19,5	40,7	43,3	59,1	93,7
926,3	86,4	81,0	-5,4	27,9	28,4	30,1	27,0	28,7	55,4	72,7
920,9	105,3	79,1	-26,2	34,0	34,7	36,6	17,7	18,7	52,4	69,6
894,7	108,9	68,5	-40,4	35,2	35,8	37,9	16,3	17,4	52,1	68,7
854,3	105,5	62,5	-43,0	34,1	34,7	36,7	16,5	17,5	51,2	70,7
811,3	113,6	59,0	-54,6	36,7	37,4	39,5	16,7	17,8	54,1	71,2
756,7	115,4	57,1	-59,8	37,3	38,1	40,0	16,0	17,0	54,1	70,6
697,4	122,8	44,9	-77,9	39,6	40,4	42,8	12,9	13,6	53,3	69,1
619,5	124,8	57,8	-67,0	40,3	41,0	43,5	12,1	12,9	53,1	68,6
552,5	125,6	33,4	-92,2	40,5	41,4	43,7	12,1	12,9	53,5	68,0
460,3	124,4	31,7	-92,7	40,3	41,0	43,1	12,1	12,9	53,5	68,6
				411,2					648,9	862,9
				34,3					54,07	71,91

Верхней ГЭС;  $H_{Cp}$  — напор Средней ГЭС.

суммарная гарантированная мощность 159 *мгвт* перераспределяется: на (XI—IV) — 162 *мгвт*. Мощность июня превышает гарантированную вследствие притока в Среднее водохранилище.

Известно, что эффективность энергетического регулирования повышается с увеличением размеров площади зеркала водохранилища и величины суммарного напора, на котором используются сбрасываемые запасы воды, т. е. с увеличением удельного запаса энергии водохранилища, и уменьшается с увеличением расхода, поступающего с выше лежащего участка реки, в связи с использованием его на пониженном напоре при сработке водохранилища. Поэтому принимается [9, 10], что в первую очередь должно сбрасываться то водохранилище, которое в данный достаточно малый интервал времени  $\Delta t$  обладает наибольшим показателем  $K$  экономичности энергетического регулирования

$$K = \frac{F \Sigma H}{Q_{пр} + \xi \Sigma Q_{тр}}, \quad (8.11)$$

где  $F$  — площадь водного зеркала водохранилища;  $\Sigma H$  — суммарный напор, на котором используются сбрасываемые запасы воды водохранилища;  $Q_{пр}$  — расход частной приточности в рассматриваемое водохранилище;  $Q_{тр}$  — полный транзитный расход воды (поступающий с выше лежащей установки);  $\xi$  — коэффициент потерь напора за счет сработки водохранилища.

Коэффициент потерь напора определяется по выражению

$$\xi = \frac{\Delta Z' - \Delta Z}{h} = \frac{h - h'}{h} = 1 - \frac{h'}{h}. \quad (9.11)$$

Здесь  $\Delta Z$  — падение свободной поверхности между Верхней и Нижней ГЭС при наполненном водохранилище;  $\Delta Z'$  — то же при сработанном водохранилище;  $h$  — глубина сработки водохранилища;  $h'$  — величина повышения напора выше лежащей ГЭС при сработке ниже лежащего водохранилища на  $h$  (рис. 7.11).

Коэффициент  $\xi$  может изменяться практически от нуля, когда при сработке свободная поверхность опускается параллельно (что характерно для широких и глубоких водохранилищ), вследствие чего напор выше лежащей ГЭС увеличивается на ту же величину  $h$ , до  $\xi = 1$ , когда рассматриваемая установка не влияет на напоры выше лежащей ГЭС, т. е. не подпирает ее.

Входящие в выражение (9.11) величины падений свободной поверхности  $\Delta Z$  могут быть найдены по номограммам, аналогичным показанным на рис. 6.10.

По мере сработки водохранилища величина показателя экономичности энергетического регулирования  $K$  уменьшается вследствие уменьшения напора и площади зеркала и увеличения

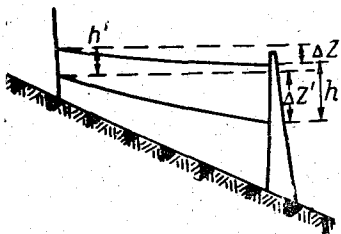


Рис. 7.11. Схема к определению коэффициента потерь напора.

коэффициента  $\xi$  из-за увеличения падения свободной поверхности. Ввиду этого если в данный интервал времени наибольшее значение  $K$  соответствует одной ГЭС, то в последующее время максимум  $K$  может соответствовать другой ГЭС.

Чтобы установить целесообразную последовательность сработки водохранилищ энергосистемы в течение всего периода межени, необходимо, используя зависимость (8.11), построить хронологический график изменения величин  $K$  по каждой ГЭС. Для этого нужно иметь график нагрузок системы и гидрографы притока (по прогнозу или расчету).

Вычисление величин  $K$  начинается с момента начала межени, т. е. с начала сработки водохранилищ. Рассчитав какой-то интервал времени  $\Delta t_1$ , за который по условиям нагрузок требовалась дополнительная выработка электроэнергии  $\Delta E_1$ , определив сработку водохранилища с максимальным значением  $K$  (а может быть и некоторых других водохранилищ), переходят к рассмотрению следующего интервала  $\Delta t_2$ . Если показатель  $K$

по-прежнему остается наибольшим для данного водохранилища, то продолжается его сработка. Такое положение сохраняется до того момента, пока этот показатель не станет равным показателю другого водохранилища. По условиям минимума потерь энергии отсюда должна начаться их совместная сработка. Сработка других водохранилищ должна начаться после уравнивания с их показателями  $K$  показателей уже срабатываемых водохранилищ.

Вид хронологического графика изменения показателя  $K$  для системы четырех регулируемых ГЭС представлен на рис. 8.11 [10].

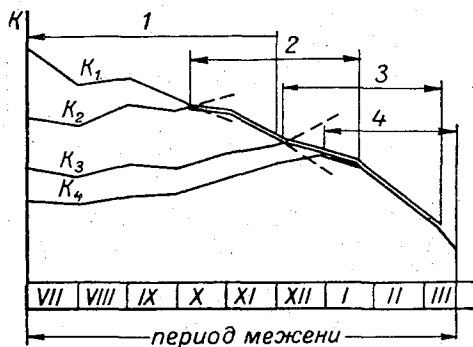


Рис. 8.11. Хронологические графики изменения показателей экономичности энергетического регулирования четырьмя водохранилищами каскада.

1, 2, 3, 4 — периоды сработки каждого из четырех водохранилищ.

### Литература

1. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеоздат, Л., 1952.
2. Плешков Я. Ф. Расчет системы водохранилищ на основе теории вероятностей. Гидротехническое строительство, № 6, 1941.

3. Щербина И. Н. Методика исследования энергетической эффективности гидроустановок, работающих в каскаде. Труды Первого совещания по регулированию стока. Изд. АН СССР, 1946.
4. Иванов Г. П. Некоторые частные задачи многолетнего регулирования стока. Труды Первого совещания по регулированию стока. Изд. АН СССР, 1946.
5. Бахтиаров В. А. Расчеты компенсированного многолетнего регулирования стока на основе метода Г. П. Иванова. Труды ЛГМИ, вып. 4, 1956.
6. Бахтиаров В. А. Энергетические водохранилища Крайнего Северо-Запада и их народнохозяйственное значение. Тезисы докладов на конференции по энергетике Карельской АССР и Мурманской области. Петрозаводск, 1958.
7. Шимельмиц И. Я. и Рубинштейн М. И. Гидрологические и водохозяйственные предпосылки для объединения гидроэлектростанций Центральной Сибири. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI, Гидрометеоиздат, Л., 1959.
8. Стельмах П. В. Определение гарантированной мощности при компенсирующем регулировании. Тезисы докладов на Всесоюзной конференции по гидрологии, зимнему режиму и регулированию стока. АН СССР, 1952.
9. Флексер Я. Н. Эксплуатация гидросиловых установок. Сельхозгиз, М., 1954.
10. Коваленко Б. Г. Последовательность сработки водохранилищ регулируемых ГЭС энергетической системы. Гидротехническое строительство, № 12, 1957.

## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

### ПОСЛЕДСТВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ. ОЦЕНКА НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

#### § 1. ИЗМЕНЕНИЕ УРОВЕННОГО РЕЖИМА ВОДОТОКА В ЗОНЕ ПОДПОРА

Изменение уровня режима водотока в зоне влияния подпора по сравнению с естественными условиями тем значительнее, чем ближе к подпорным сооружениям расположено рассматриваемое сечение. На ближайшем к сооружениям протяжении, где свободные поверхности близки к горизонтальным, уровень режим при подпоре полностью определяется режимом работы водохранилища. На участках же, удаленных от сооружений, на уровень режим оказывает влияние также и характер хода поступающих в водохранилище расходов. Для незарегулированных верховыми водохранилищами водотоков поступление расходов определяется ходом естественного стока, для зарегулированных — режимом работы выше расположенных водохранилищ.

По характеру изменений уровня режима все протяжении водохранилища может быть разбито на три участка, показанные на рис. 1.12 [2]. Участок *А*, прилегающий к сооружениям, характеризуется обычно значительным превышением подпертых уровней над естественными, малыми уклонами водного зеркала и, как правило, сравнительно небольшими колебаниями уровней при подпоре (колебания происходят в пределах высоты призмы рабочей емкости).

Участок *Б* характеризуется большими уклонами свободной поверхности, большей амплитудой колебания уровней и меньшими, чем на участке *А*, превышениями высокого и низкого подпертых уровней над соответствующим максимальным и минимальным естественными уровнями.

Участок *В* (хвостовой участок водохранилища) характеризуется наиболее значительными уклонами свободной поверх-

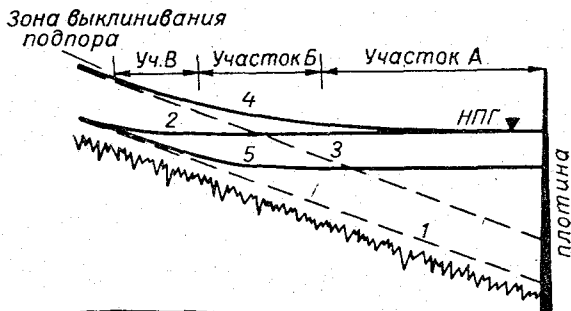


Рис. 1.12. Продольный профиль водохранилища с показанием характерных по уровенному режиму участков.

1 — меженный уровень в естественных условиях, 2 — то же, после подпора, 3 — максимальный уровень половодья в естественных условиях, 4 — то же, после подпора, 5 — меженный уровень при сработавшем водохранилище.

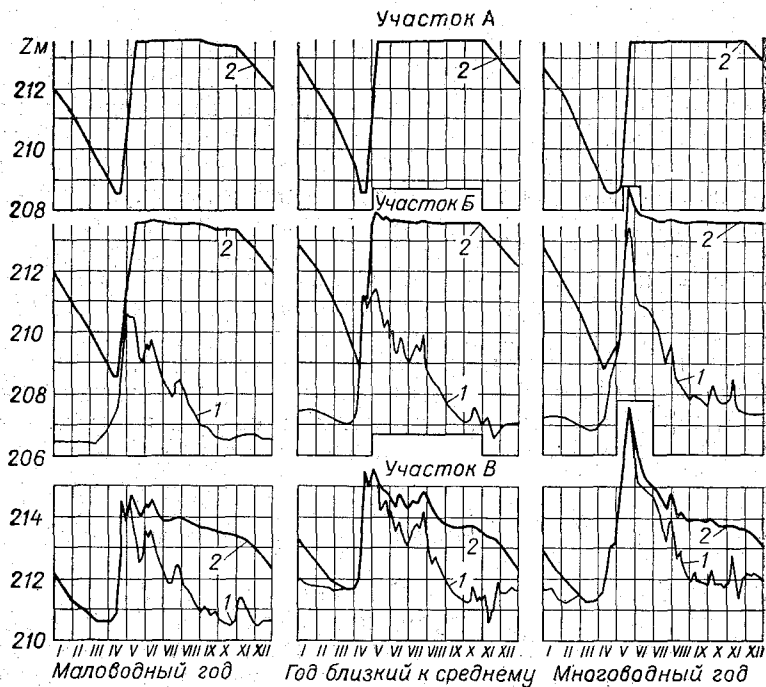


Рис. 2.12. Графики уровней естественных (1) и при подпоре (2) в характерных сечениях различных участков водохранилища А, Б и В.

На участке А естественные уровни (1) находятся за пределами рисунка.

ности и небольшими превышениями высокого и низкого подпертых уровней над соответствующим максимальным и минимальным естественными уровнями. На этом участке амплитуда колебания уровней при подпоре близка к амплитуде в естественных условиях.

Уровненный режим при подпоре в сопоставлении с режимом уровней в естественном состоянии реки можно видеть на рис. 2.12, на котором показаны соответствующие графики в характерных сечениях различных участков водохранилища (А, Б и В), осуществляющего сезонное регулирование стока. Графики построены по маловодному, близкому к среднему и многоводному году.

Если выше расположенными водохранилищами осуществляется срезка пиков паводков, то в хвостовой части водохранилища максимальные уровни при подпоре могут оказаться ниже максимальных естественных.

На размеры народнохозяйственного ущерба, наносимого образованием водохранилища, а также на характер защитных мероприятий от затоплений и подтоплений наибольшее влияние оказывают длительно поддерживаемые уровни (при сезонном регулировании обычно соответствующие отметки НПГ) и отклонения их в сторону повышения. Отклонение уровней в сторону понижения при сработке водохранилища обычно не наносит дополнительного ущерба народному хозяйству, однако, как ранее отмечалось, должно учитываться при выборе отметки заложения водозаборов, при проектировании судового хода и затонов для отстоя судов, при назначении низа крепления откосов и т. д.

## § 2. ПОСТОЯННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ЗАТОПЛЕНИЯ. ПОДТОПЛЕНИЕ

Различают постоянные и временные затопления. В чисто гидрологическом понимании постоянными считаются затопления, в результате которых затопляемые объекты не обнажаются из-под воды; при временных — объекты затопляются лишь эпизодически. Такое понимание, однако, не отражает экономической стороны вопроса, так как иногда и при временных затоплениях определенной длительности наносятся ущербы, равные ущербам при постоянных затоплениях.

Временные затопления обычно вызываются:

- а) временным подпором уровней при наполнении водохранилища и быстрой его сработке;
- б) при проходе паводочных волн;
- в) ветровой волной и нагоном;
- г) зажорами и заторами льда.

Последствием временных затоплений является временное выключение затопляемых объектов и повреждение или разрушение объектов.

На сельское хозяйство временные затопления влияют различно. Например, рожь погибает после 8—10-дневного затопления, а после 2-дневного — снижает урожайность почти наполовину. На луговые и пастбищные культуры временные затопления в большинстве случаев влияют положительно, если при этом не происходит заболачивания почвы. Вместе с тем очень длительные временные затопления снижают продуктивность и даже качество сенокосных угодий (травяной покров перерождается в малоценную осоку).

На лесные угодья временные затопления влияния почти не оказывают.

Поскольку различные объекты по-разному реагируют на длительность затоплений, под постоянными условились понимать затопления такой длительности, при которой становится невозможным хозяйственное использование территории. Под временными же условились понимать затопления, которые по своей длительности не влекут полного изъятия территории из хозяйственного оборота.

В зависимости от характера затопляемой территории и ее возможного использования высотное положение верхней границы зоны постоянных затоплений будет различным.

Например, при быстрой сработке водохранилища сразу же после прохода весеннего половодья освобождающаяся от воды земля может быть использована под сенокосные угодья. В этом случае полностью будут подлежать исключению лишь постоянно затопляемые земли.

Территория, используемая в несельскохозяйственных целях и по своим качествам не пригодная для естественных лугов, подлежит исключению из хозяйственного оборота, начиная с более высоких отметок.

Если, например, будет установлено, что для данного водохранилища из хозяйственного использования подлежат исключению земли, подвергающиеся затоплению при максимальном расходе обеспеченностью 5%, верхняя граница зоны постоянных затоплений по длине водохранилища будет располагаться на разных отметках, отвечающих кривой свободной поверхности при рассматриваемом расходе. Временно затопляемая территория при этом будет располагаться в высотной зоне между принятой верхней границей постоянных затоплений и кривой свободной поверхности при наибольшем максимальном расходе. Так как на ближайшем к сооружениям участке временные затопления полностью отсутствуют, а на хвостовом участке водохранилища они почти не отличаются от естественных (см. на рис. 1.12 свободные поверхности 2 и 4), особый интерес эти затопления представляют для среднего участка (Б), на котором ухудшение условий временного затопления под воздействием водохранилища наиболее ярко выражено. Это ухудшение в основном сводится к увеличе-



нию длительности стояния высоких уровней при подпоре по сравнению с естественными условиями, что наглядно показано на рис. 3.12. На нем представлены кривые продолжительности уров-

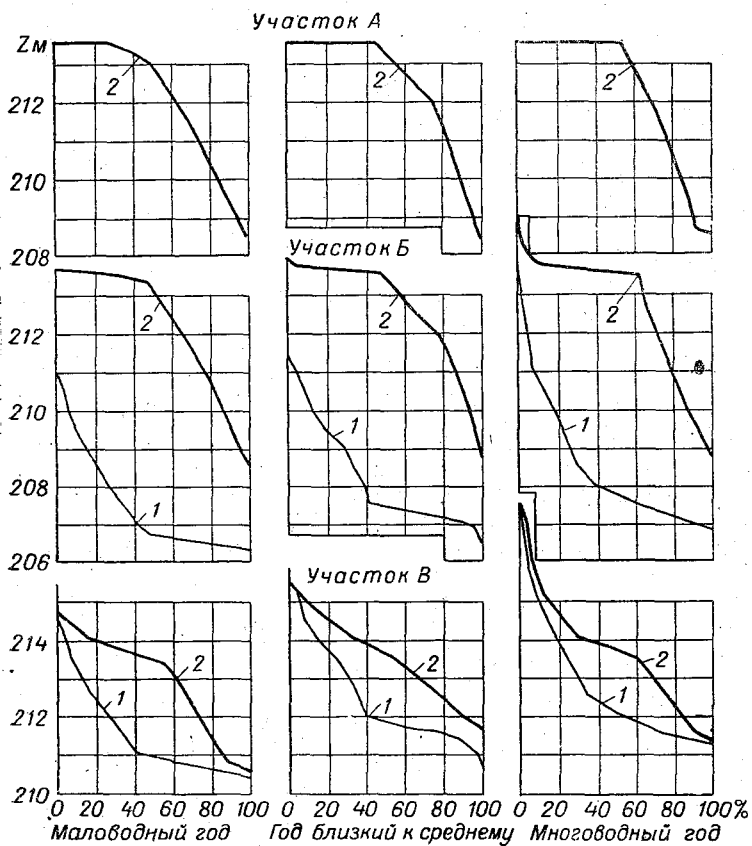


Рис. 3.12. Кривые продолжительности уровней естественных (1) и при подпоре (2) в характерных сечениях различных участков водохранилища А, Б и В.

На участке А естественные уровни (1) находятся за пределами рисунка.

ней естественных и при подпоре, хронологические графики которых приведены на рис. 2.12.

Образование водохранилища почти всегда вызывает повышение уровня грунтовых вод в прилегающей к водохранилищу территории. Возможное повышение уровня грунтовых вод зависит прежде всего от высоты длительно создаваемого подпора, который уменьшается по мере удаления от сооружений к хвостовой

части водохранилища, а также и от геологических и гидрогеологических условий.

В пористых грунтах обязательно произойдет повышение уровня грунтовых вод и даже может измениться направление движения грунтовых вод (рис. 4.12).

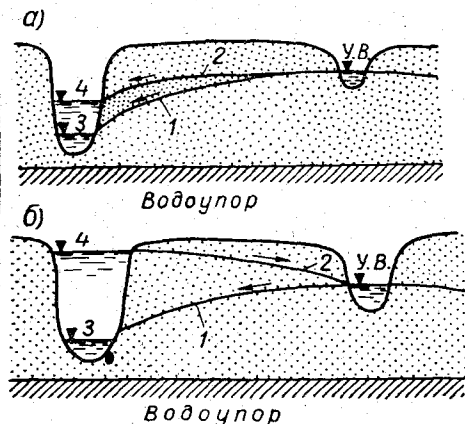


Рис. 4.12. Схемы подпора грунтовых вод.

1 — уровень грунтовых вод в естественных условиях, 2 — уровень грунтовых вод после подпора, 3 — уровень воды в реке до подпора, 4 — уровень воды водохранилища.

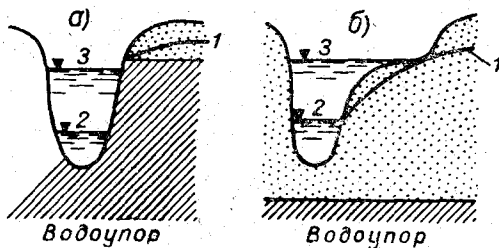


Рис. 5.12. Случаи, когда подпор не вызывает повышения уровня грунтовых вод.

1 — уровень грунтовых вод, 2 — уровень воды в реке до подпора, 3 — уровень воды водохранилища.

Повышения уровня грунтовых вод может и не произойти, если по геологическим условиям исключается связь грунтовых вод с водохранилищем (рис. 5.12 а), или когда по условиям рельефа береговой полосы урез воды после подпора приближается к уровню грунтовых вод (рис. 5.12 б).

Допустимый подъем уровня грунтовых вод зависит от характера использования территории, климатических и геологических условий и т. д. В засушливой зоне, например, значительный подъем уровня грунтовых вод будет желательным для сельскохозяйственного производства, если это, конечно, не вызовет засоления почв, в то время как в зоне избыточного увлажнения такое повышение уровня грунтовых вод приведет к неблагоприятным последствиям — к замедлению роста растений и заболачиванию.

Повышение уровня грунтовых вод может затруднить эксплуатацию фундаментов зданий и разного рода сооружений, вызвать затопление подвальных помещений, шахт, штолен и т. п., а также вызвать изменение несущей способности грунтов.

Повышение уровня грунтовых вод, при котором происходит ухудшение условий эксплуатации тех или иных объектов, и нарушение нормальной хозяйственной деятельности человека на-

зывают подтоплением. Размер площадей подтоплений по отношению к площадям затоплений по ряду водохранилищ колеблется от 10% (Кочетовское водохранилище) до 71% (Киевское).

### § 3. ПЕРЕРАБОТКА БЕРЕГОВ И ОПОЛЗНЕВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Под влиянием колебаний уровней и ветровой волны, достигающей высоты 2—3 м и более, берега крупных водохранилищ сразу же после их затопления начинают трансформироваться. Первоначально этот процесс идет очень интенсивно (пока берега водохранилища не приспособятся к новым гидрологическим условиям), а впоследствии затухает. Указанное явление получило название «переработки берегов».

В результате переработки береговая линия отступает, что приводит к потере территории. Вместе с тем на отдельных участках наблюдается обратное явление — отложение наносов, приводящее иногда к образованию нежелательных в санитарном отношении мелководий или к уменьшению глубины судового хода и т. д.

Интенсивность переработки берегов водохранилищ зависит от прочности пород, слагающих берега, волнового режима, амплитуды колебаний уровней водохранилища, крутизны и высоты откосов и т. д. На некоторых эксплуатируемых водохранилищах береговая линия в результате переработки берегов отступает на десятки метров в течение года. Прогнозируемое на основе специальных расчетов [13] конечное отступление береговой линии измеряется сотнями метров, а иногда достигает километров [2].

Образование водохранилища может оказать влияние и на ход оползневых процессов в его берегах, в одних случаях способствуя появлению новых оползней, в других — активизируя старые. Активизация оползневых процессов происходит в основном из-за повышения уровня грунтовых вод на прилегающей к водохранилищу территории, а также вследствие резкого усиления воздействия на береговую откос ветровой волны. Наблюдались однако случаи, когда образование водохранилища способствовало затуханию оползневых процессов, что может быть объяснено, в частности, уменьшением скорости фильтрации выклинивающихся на береговом откосе грунтовых вод [2].

### § 4. ИЗМЕНЕНИЕ ОБЩЕСАНИТАРНОЙ И МАЛЯРИЙНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

Не касаясь в настоящей главе вопросов искусственного загрязнения водотоков сбросом в них промышленных и городских сточных вод (см. гл. 1), общесанитарная и малярийная обстановка в данном районе в значительной мере определяется наличием заболоченных пространств и мелководий, хорошо прогрее-

ваемых солнцем, слабопроточных и защищенных от волнения. Болота и мелководья являются рассадниками малярийных комаров и других кровососущих насекомых, и, в особенности, мошкар.

Мелководьями в естественных условиях служат многочисленные временные водоемы, образующиеся в понижениях рельефа на поймах рек, которые периодически затопляются паводком. При создании значительного подпора в связи с образованием водохранилища подобные мелководья, а также болота в пределах нижнего (А) и среднего (Б) участков исчезают, как это имело место на Куре в зоне Мингечаурского водохранилища и в ряде других случаев. Вместе с тем при образовании водохранилищ почти всегда появляются новые мелководья, главным образом в их хвостовой части (В), площадь которых иногда может превысить площадь мелководий и болот в естественных условиях, что приведет даже к ухудшению общесанитарной и малярийной обстановки. При ожидаемом ухудшении этой обстановки необходимо предусмотреть в проекте соответствующие мероприятия по ее улучшению.

Неблагополучными в общесанитарном и малярийном отношении признаются мелководья с глубинами, не превышающими 1,5—2 м, в которых возможно появление водной растительности, отсутствует течение и волнение и т. п. Однако вблизи крупных населенных пунктов иногда признаются нежелательными и участки водохранилищ с несколько большими глубинами. По разным водохранилищам площадь мелководных затоплений по отношению ко всей площади зеркала водохранилища при отметке НПГ колеблется от 11% (Цимлянское водохранилище — 314 из 2700 км<sup>2</sup>) до 26% (Чебоксарское — 1014 из 3800 км<sup>2</sup>).

Отнесение мелководных участков водохранилищ к категории малярийных или недопустимых по общесанитарным признакам производится органами здравоохранения.

К настоящему времени в нашей стране проделана огромная работа по борьбе с малярией, которая привела почти к полному и повсеместному прекращению заболеваний ею. Характерен в этом отношении пример с долиной р. Куры, где в результате образования Мингечаурского водохранилища и проведения ряда других мероприятий полностью искоренена малярия.

## § 5. ПОДГОТОВКА ЧАШИ ВОДОХРАНИЛИЩА К ЗАТОПЛЕНИЮ

Создание подпора при образовании водохранилища приводит к ряду неблагоприятных явлений, с которыми связаны серьезные нарушения в народном хозяйстве. Затопляются десятки, а иногда и сотни тысяч гектаров, удобных в сельскохозяйственном отношении земель — пашен и лугов, а также лесных угодий. Образование водохранилища в обжитых районах приводит к затоплениям

строений, разного рода сооружений, промышленных предприятий, участков железных и шоссейных дорог, линий электропередач и связи и т. п. Среди объектов затоплений могут оказаться месторождения полезных ископаемых, исторические, археологические и архитектурные памятники и др.

Наряду с нарушениями от постоянных затоплений возникают нарушения от временных затоплений, а также от подтоплений, переработки берегов и других явлений.

Для устранения последствий нарушений в народном хозяйстве и для организации нормальной жизни и производственной деятельности населения в новых условиях необходимо проведение ряда сложных и дорогостоящих мероприятий по подготовке водохранилища к затоплению начиная с переноса или защиты затрагиваемых объектов до противомаларийных мероприятий, археологических раскопок и т. п. Попадающие в зону отрицательного воздействия подпора народнохозяйственные объекты подлежат всестороннему инженерному и экономическому изучению с целью принятия решения о их переносе на новое место или реконструкции, защиты и т. д.

В состав мероприятий по подготовке чаши водохранилища к затоплению входят следующие работы: а) перенос сельских населенных пунктов и переселение их населения в незатопляемые места; б) земельно-хозяйственное переустройство колхозов, совхозов и подсобных хозяйств на новых местах; в) свodka леса и очистка от него зоны затоплений; г) перенос или защита городов и крупных промышленных предприятий; д) переустройство линий связи и электропередач, перенос или подъем и укрепление железных и других дорог; е) ускорение разработки полезных ископаемых или защита месторождений; ж) санитарная, противозидемическая и противомаларийная подготовка; з) археологическое изучение территории и раскопки, перенос памятников культуры или их защита; и) осуществление мер борьбы со всплыванием торфа и др.

Кроме указанных работ по подготовке водохранилища к затоплению, особое место занимают мероприятия по воднотранспортному и рыбохозяйственному их освоению. При воднотранспортном освоении учитывается коренное изменение условий судоходства и лесосплава в водохранилище по сравнению с естественным руслом реки.

В результате этих изменений приходится осуществлять замену технического оснащения флота — речной флот заменять озерным, а в лесосплаве переходить на озерные виды транспортировки леса: плотами с буксирной тягой, кошелями и др. Кроме того, учитывается возникновение новых портов, пристаней, судоремонтных заводов, необходимость улучшения и совершенствования навигационной обстановки водохранилища и т. д. При рыбохозяйственном освоении водохранилища учитываются изменения

в благоприятную сторону для интенсивного рыборазведения и рыбодобычи. В настоящее время на ряде водохранилищ уже освоено искусственное разведение карповых, сиговых, лососевых, осетровых и других пород рыб, и уловы значительно повысились по сравнению с современными условиями. Поэтому рыбохозяйственное освоение водохранилища обуславливает организацию специальных рыбопромысловых участков, рыбоводных заводов и т. п.

## § 6. ЗАЩИТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Мероприятия, заключающиеся в изъятии из дальнейшего хозяйственного использования территории с выносом расположенных на ней объектов на новые места, носят п а с с и в н ы й характер. При подготовке водохранилищ к затоплению применяются и так называемые а к т и в н ы е мероприятия, предусматривающие строительство специальных сооружений для защиты объектов от отрицательного воздействия подпора или приспособление объектов к новым гидрологическим и гидрогеологическим условиям путем соответствующего их переустройства.

К защитным относятся следующие мероприятия: а) обвалование для защиты от затоплений; б) дренаж для защиты от подтопления; в) берегоукрепление для защиты от переработки берегов и оползневых явлений; г) подсыпка территории для защиты от подтопления и ликвидации мелководий в противомалаярийных, общесанитарных и других целях; д) подсыпка насыпей дорог и усиление сооружений мостовых переходов с подъемом пролетных строений мостов для восстановления судоходных подмостовых габаритов; е) гидроизоляционные работы на зданиях и сооружениях, попадающих в подтопление; ж) переустройство водозаборных сооружений и канализационных выпусков для приспособления их к измененному уровенному режиму водотока и др.

Защитные мероприятия во многих случаях приводят к более выгодным экономическим решениям, так как способствуют уменьшению затрат по перестройке различных отраслей народного хозяйства, позволяют оставить на месте затрагиваемые подпором населенные пункты, промышленные предприятия и другие объекты, тем самым исключая дорогостоящие восстановительные работы на новых местах. Так, например, инженерная защита г. Казани, находящегося в зоне подпора Волжской ГЭС им. В. И. Ленина — дала экономии капитальных затрат на сумму не менее 60—70 млн. руб. по сравнению с затратами на вынос объектов из зоны водохранилища [2].

В качестве примеров наиболее крупных работ по инженерной защите укажем на следующие: по водохранилищу Горьковской ГЭС — земельный массив Костромской низины, города Кинешма, Кострома, Юрьевец и др., по водохранилищу Волжской ГЭС

им. В. И. Ленина, города Казань, Ульяновск, Сенгелей и др., по водохранилищу Каховской ГЭС — г. Никополь, район Каменский Под, месторождения полезных ископаемых. Защитные мероприятия предусмотрены или предусматриваются и на многих других водохранилищах: Красноярском, Каменском, Кременчугском, Воткинском, Новосибирском и т. д.

В общей стоимости затрат по водохранилищам (без затрат на воднотранспортное и рыбохозяйственное освоение водохранилищ) затраты по инженерной защите достигают: по водохранилищу Волжской ГЭС им. В. И. Ленина 35%, Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС 30%, Каховской ГЭС 55% и т. д.

Кроме экономических выгод, защитные мероприятия имеют еще и те преимущества, что в прибрежной полосе и мелководной зоне они придают водохранилищу вид культурного водоема с устойчивыми берегами, без антисанитарных мелководий, сохраняют существующий жилищный фонд и т. п.

Так как зона мелководий водохранилищ на равнинных реках достигает больших размеров, к вопросу их использования проявляется значительный интерес. На крупных водохранилищах в ряде случаев проведена защита путем обвалования ценных сельскохозяйственных угодий, попадающих в мелководное затопление. Обвалование осуществлено в приднепровской пойме при строительстве ДнепрогЭС. Валами защищаются от затопления Костромская низина на Горьковском водохранилище (16 тыс. га), обвалован Каменский Под на Каховском водохранилище (17 тыс. га) и др. [3]. В последние годы делаются попытки использовать мелководья для посевов дикого риса, являющегося ценной кормовой культурой, и других кормовых трав, например канареечника. В этой проблеме, однако, имеются неясные вопросы, в частности, как влияют на посевы риса внутригодовые и многолетние колебания уровней водохранилища. В настоящее время институтом Гидропроект и Ботаническим институтом ВАСХНИЛ проводятся наблюдения над посевами дикого риса и канареечника на мелководьях водохранилищ Волжской им. В. И. Ленина, Цимлянской и других ГЭС. Результаты этих наблюдений будут иметь большое практическое значение для полезного использования мелководных зон водохранилищ.

#### **§ 7. ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ СООРУЖЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПОСЛЕДСТВИЯ И МЕРОПРИЯТИЯ**

Под влиянием регулирования стока происходит изменение гидрологического режима в нижних бьефах сооружений. Указанное изменение режима тем значительнее, чем больше глубина осуществляемого водохранилищем регулирования. Наиболее значительное изменение в гидрологический режим нижнего бьефа сооружений вносит многолетнее регулирование, под влиянием

которого резко повышаются низкие (летние и зимние) и понижаются высокие (половодные и паводочные) расходы воды. С изменением поступления расходов в нижних бьефах сооружений изменяется уровенный режим, характер уклонов и скоростей течения. Водохранилища воздействуют на термический и ледовый режим нижних бьефов, а также на режим твердого стока. Указанные изменения в свою очередь сказываются на русловых процессах нижних бьефов, вызывая переформирование русла со всеми вытекающими из этого последствиями.

В связи с трансформацией водохранилищем паводочных волн повышается влияние расходов на уровни и уклоны нижних бьефов, впадающих ниже гидроузлов крупных притоков. Это приводит к нарушению связи между расходами и уровнями, особенно в периоды прохождения паводков на притоках. Характерным в этом отношении является участок Нижнего Дона от Цимлянской ГЭС до устья Северного Донца, на котором произошло коренное изменение соотношения расходов главной реки и притока при прохождении весеннего половодья. Половодье на Северном Донце стало проходить при низких уровнях Дона, что обуславливает подпор уровней последнего Северным Донцом. До зарегулирования же стока Цимлянским водохранилищем, наоборот, Северный Донец во время половодья находился в подпоре от Дона. Поэтому в период весеннего паводка скорости течения на Дону, ниже Цимлянской ГЭС, стали меньше, а на Северном Донце больше по сравнению с тем, что было до постройки сооружений [5].

Уменьшение скорости течения на главной реке и увеличение скорости в низовьях притоков приводят в период половодья к выносу с притоков наносов, которые оседают в русле главной реки. Это обуславливает образование новых перекатов или увеличение существующих.

Суточное регулирование, как уже отмечалось, вызывает резкие колебания расходов и уровней в нижнем бьефе ГЭС, которые, однако, распространяются на расстояние не более 75—100 км от плотины.

В зимнее время в нижнем бьефе сооружений имеет место полынья, длина которой находится в зависимости от местных условий, гидрометеорологической обстановки и др. В течение зимы длина полыньи меняется, и наименьшие размеры ее 5—10 км, а иногда и меньше наблюдаются в наиболее холодные месяцы (январь—февраль). Полынья является источником образования шуги. Шуга, скапливаясь под ледяным покровом за пределами полыньи, создает зажорные подьемы уровней, распространяющиеся и на полынью (см. гл. 9).

Крупное водохранилище оказывает осветляющее влияние на мутный поток, проходящий по нему. Благодаря этому в нижний бьеф поступает вода, освобожденная от наносов крупных фрак-



ций (обычно  $>0,02$  мм). Стремясь восстановить свое прежнее насыщение наносами, осветленный поток производит размывы русла в нижнем бьефе, которые продолжают длительное время и распространяются на сравнительно большое расстояние от плотины (5—10 км). В отличие от так называемых местных размывов (происходящих непосредственно за плотиной), являющихся результатом гашения энергии потока и не вызывающих понижения уровня, размывы русла энергией осветленного потока обычно вызывают понижение уровня нижнего бьефа. Такие размывы называются общими, они могут иметь место лишь при наличии размываемых грунтов. Понижение уровня нижнего бьефа в результате общих размывов может достигать 1,0—1,5 м, а иногда и более (например, в проекте Усть-Каменогорской ГЭС учтено возможное понижение уровня нижнего бьефа на 1,5 м).

Резкое снижение высоких расходов воды под влиянием регулирования стока вызывает сокращение, а иногда и полное прекращение разливов рек в половодье, что имеет двойное значение для народного хозяйства страны.

В условиях Европейской территории СССР, Казахстана, Сибири и др. срезка высоких расходов весенних половодий приводит к нарушению водного режима пойменных лугов (сенокосных угодий), являющихся кормовой базой животноводства ряда районов. В результате срезки максимальных расходов пойменные луга частично или полностью превращаются из заливных в суходольные, вследствие чего сокращается их продуктивность, т. е. имеет место частичная, а иногда и очень существенная потеря кормов для животноводства.

В условиях же Дальнего Востока, например, срезка высоких расходов, по времени совпадающих с периодом роста и уборки сельскохозяйственных культур, наоборот, создает благоприятное положение, поскольку уменьшает или устраняет наводнения, носящие там характер бедствий. Борьба с наводнениями приносит большую выгоду за счет снижения прямых убытков, а также за счет включения в хозяйственное использование территорий, ранее подвергавшихся почти ежегодному затоплению летними паводками.

Регулирование стока имеет своим последствием также изменение условий водного транспорта на участках ниже гидротехнических сооружений. Это изменение в общем благоприятно отражается на водном транспорте, так как в период межени навигационные расходы обычно повышаются, а с ними повышаются и минимальные (гарантийные) глубины судового хода. Снижение же расходов в периоды высокого стока хотя и приводит к уменьшению дифференцированных глубин (см. § 4, гл. 2), однако потери на водном транспорте от этого меньше по сравнению с выгодами от увеличения гарантийных глубин.

Увеличение зимних расходов воды при регулировании стока

приводит иногда к резкому повышению уровней на участках ниже сооружений в связи с пониженной пропускной способностью русла в зимнее время. Как правило, это приводит к зимним затоплениям.

Таким образом, образование водохранилища оказывает очень существенное и в то же время самое разнообразное влияние на хозяйства прибрежных районов не только в зоне подпора, но также и в нижних бьефах сооружений.

Примером неблагоприятного воздействия регулирования стока является среднее течение Иртыша от г. Усть-Каменогорска до г. Омска, протяжением 1300 км. В результате глубокого многолетнего регулирования, осуществляемого водохранилищем Бухтарминской, а впоследствии Шульбинской ГЭС, будут исключены затопления поймы весенним половодьем (до постройки Шульбинской ГЭС частичное затопление поймы сохраняется за счет половодного стока притоков Иртыша — рр. Ульбы и Убы), а в зимнее время уровни значительно повысятся. Это приведет, с одной стороны, к снижению продуктивности лугов, с другой — к некоторым зимним затоплениям [6].

Примерами благоприятного воздействия регулирования стока могут служить водохранилища, проектируемые на Амуре, Зее, Улахэ и др. В результате зарегулирования паводков будет резко снижена частота наводнений на них, сократятся убытки, а освобождающиеся от почти ежегодных затоплений земли будут использованы под устойчивое сельскохозяйственное производство.

Для ликвидации неблагоприятных последствий регулирования стока в нижних бьефах сооружений требуется проведение ряда мероприятий по компенсации теряемых для животноводства кормов путем организации лиманного или правильного орошения на осушаемых регулированием паводков землях, по защите (или выносу) некоторых населенных пунктов и предприятий от затоплений в зимнее время и т. д. Могут также применяться меры по созданию так называемых «искусственных паводков» для временного затопления поймы путем сосредоточенных специальных попусков из водохранилищ. Такие специальные попуски намечается осуществить из водохранилища Бухтарминской ГЭС (р. Иртыш), Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС и др.

#### **§ 8. НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ УЩЕРБЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СОЗДАНИЕМ ВОДОХРАНИЛИЩ**

Осуществление мер защиты от затоплений, подтопления территории и от переработки берегов, вынос объектов на новые места, проведение противомаларийных и общесанитарных мероприятий, водотранспортное и рыбохозяйственное освоение водохранилищ, а также проведение ряда мероприятий в нижних

бьефах сооружений по локализации нарушений в народном хозяйстве в связи с регулированием стока требует больших единовременных (капитальных) затрат и ежегодных расходов (издержек). Оценка указанных затрат является очень ответственной и сложной задачей, поскольку созданием водохранилища одновременно затрагиваются различные отрасли хозяйства.

Капитальные затраты зависят как от размеров создаваемого водохранилища, так и от степени освоенности подлежащей затоплению территории и нижних бьефов сооружений. Размер затрат зависит также и от того, будут ли затрагиваемые объекты переноситься на новые места или будут защищаться и реконструироваться применительно к новой обстановке и т. д.

Чтобы правильно оценить масштабы возможных последствий от образования водохранилища, а отсюда и размеры требуемых затрат на его подготовку, а также на мероприятия по нижнему бьефу, требуется составить прогноз затоплений, подтоплений, переработки берегов и других явлений на длительный период эксплуатации водохранилища. Этот прогноз составляется на основе изучения водохозяйственных, гидрологических, гидравлических, геологических и гидрогеологических данных и тщательных инженерных расчетов. Методика подобных расчетов излагается в специальной литературе [2], [13] и др.

Капитальные затраты на подготовку водохранилища и по нижнему бьефу включаются в общие затраты по всему водохозяйственному комплексу.

Опыт показывает, что затраты на подготовку, например, водохранилищ гидроэлектростанций по отношению к суммарным капитальным вложениям в отдельных случаях достигают внушительных величин — до 50%. В зависимости от местных условий доля затрат по подготовке водохранилищ ГЭС колеблется в следующих примерно пределах: в районе Украины — 25—45%, Волжско-Камского района — 10—50%, на Ангаре — 5—25%, Иртыше — 10—20%, Карелии — 10—15% и т. д.

Так как затраты по организации водохранилищ достигают очень больших размеров, они нередко ограничивают высоту подпора — отметки НПГ, несмотря на сравнительно высокий водохозяйственный или энергетический эффект, который может быть получен при более высокой отметке НПГ. Так, из-за значительных дополнительных затрат по водохранилищам технико-экономическими расчетами были оправданы пониженные значения отметок НПГ для Днепрогэс (из-за затоплений Днепропетровска и Днепродзержинска), Пермской (из-за затоплений комбината), Красноярской (из-за затоплений Абакана и Минусинска) и ряда других ГЭС.

## § 9. ОЦЕНКА НАРОДНОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

### Критерий экономической целесообразности осуществления водохозяйственных мероприятий

Оценка экономической целесообразности и народнохозяйственной эффективности того или иного водохозяйственного мероприятия (установки) производится путем сопоставления технико-экономических показателей двух возможных вариантов, в равной степени решающих поставленные народнохозяйственные задачи. Одним из наиболее распространенных в практике проектирования критериев такой оценки служит так называемый срок окупаемости.

Этот критерий применяется как для оценки эффективности мероприятия при выбранных в проекте его оптимальных параметрах, так и для оценки эффективности увеличения, например, емкости водохранилища сверх какой-то величины, повышения отметки НПГ, изменения отметки МО водохранилища, мощности насосных установок, мощности гидроэлектростанций и т. п.

Под сроком окупаемости понимается тот период, в течение которого дополнительно вложенные в данное более дорогое мероприятие единовременные затраты по сравнению с другим таким же по народнохозяйственному эффекту, но менее дорогим мероприятием вернутся государству вследствие меньших на нем ежегодных издержек в производстве.

Возьмем такой пример. Водоснабжение какого-то района можно обеспечить или созданием водохранилища на удаленном от центра потребления воды водотоке, или устройством на месте потребления артезианских колодцев, с забором воды из глубоких горизонтов. Очевидно, капитальные затраты на создание водохранилища и подвод воды к потребителям будут выше соответствующих капитальных затрат на устройство колодцев вследствие необходимости постройки дорогостоящей плотины, канала (или трубопровода) и т. д. Однако ежегодные издержки будут выше по варианту с колодцами, так как воду нужно качать насосами, на что потребуются много электрической энергии, большие расходы по обслуживанию насосов и др. В то же время эксплуатационные расходы по водохранилищу и по подаче воды из него (обычно самотеком) будут сравнительно небольшими. Если разница в ежегодных издержках будет большой, а в капитальных затратах не очень значительной, срок окупаемости окажется малым и, следовательно, с народнохозяйственной точки зрения целесообразно водоснабжение осуществить посредством водохранилища. Если же дополнительные затраты вернутся государству не скоро, перевес окажется на стороне варианта с артезианскими колодцами.

Интересен в этом отношении и пример из области энергетики. Потребность в электроэнергии может быть удовлетворена или постройкой гидроэлектростанции, или постройкой тепловой электростанции. Как известно, капитальные затраты по ГЭС обычно выше; ежегодные же издержки, наоборот, по ТЭС выше, а по ГЭС ниже. Срок окупаемости будет тем меньше, чем больше будет разница в ежегодных издержках и меньше в единовременных затратах. При небольшом сроке окупаемости дополнительных затрат предпочтение будет отдано строительству ГЭС.

В последние годы при оценке экономической целесообразности строительства ГЭС исходят из срока окупаемости  $T$  не свыше 8 лет.

Формула для определения срока окупаемости какого-либо водохозяйственного мероприятия (водохранилища, гидроэлектростанции, ирригационного сооружения и т. д.) при выбранных его оптимальных параметрах (емкости, отметки НПП и др.) имеет следующий вид:

$$T = \frac{K_1 - K_2}{I_2 - I_1} \text{ лет,} \quad (1.12)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  — капитальные затраты соответственно в более дорогом и менее дорогом мероприятии;  $I_1$  и  $I_2$  — ежегодные издержки соответственно в более дорогом и менее дорогом по капитальным затратам мероприятиях.

В несколько измененном виде формула (1.12) применяется и к непосредственному технико-экономическому обоснованию самих оптимальных параметров установки. Тогда в расчет вводятся неполные величины капитальных затрат и ежегодных издержек по сопоставляемым вариантам установок, равноценно решающих народнохозяйственные задачи (например, ГЭС и ТЭС), а их приращения  $\Delta K_1$  (ГЭС) и  $\Delta K_2$  (ТЭС), а также  $\Delta I_1$  (ГЭС) и  $\Delta I_2$  (ТЭС) для двух смежных значений параметров, например, отметки НПП и т. д.

$$T = \frac{\Delta K_1 - \Delta K_2}{\Delta I_2 - \Delta I_1} \text{ лет.} \quad (2.12)$$

### **Технико-экономические показатели водохозяйственных мероприятий**

Принятые к осуществлению водохозяйственные мероприятия на основе экономического сравнения с другими мероприятиями, равноценно решающими народнохозяйственные задачи, характеризуются определенными технико-экономическими показателями. Указанные показатели разделяются на абсолютные ( $K$  — капитальные затраты и  $I$  — ежегодные издержки производства)

и относительные, или удельные. Удельные технико-экономические показатели характеризуют капитальные затраты на единицу продукции, выдаваемой водохозяйственной или водноэнергетической установкой. Например, капитальные затраты на 1 м<sup>3</sup> воды, обеспечиваемой регулированием, на 1 кВт установленной мощности ГЭС или на 1 кВт-ч средней годовой выработки энергии. Они получаются делением капитальных затрат К руб, на величину годовой отдачи воды W м<sup>3</sup>, установленной мощности N кВт и средней годовой выработки энергии E кВт-ч:

$$\left. \begin{aligned} k_W &= \frac{K}{W} \text{ — удельные затраты на 1 м}^3 \text{ воды, руб/м}^3 \\ k_N &= \frac{K}{N} \text{ — удельные затраты на 1 кВт установленной} \\ &\quad \text{мощности, руб/кВт} \\ k_E &= \frac{K}{E} \text{ — удельные затраты на 1 кВт-ч средней} \\ &\quad \text{годовой выработки энергии, руб/кВт-ч} \end{aligned} \right\} (3.12)$$

Очень важным показателем эффективности мероприятия является себестоимость продукции, характеризующая достигнутый уровень строительной техники, совершенство эксплуатации и организации труда. Себестоимость продукции получается делением ежегодных издержек производства И руб. на объем выпускаемой продукции:

$$\left. \begin{aligned} i_W &= \frac{I \cdot 100}{W} \text{ — себестоимость 1 м}^3 \text{ воды, коп/м}^3 \\ i_E &= \frac{I \cdot 100}{E} \text{ — себестоимость 1 кВт-ч энергии,} \\ &\quad \text{коп/кВт-ч} \end{aligned} \right\} (4.12)$$

Таким образом, чтобы определить технико-экономические показатели водохозяйственных мероприятий, нужно иметь водохозяйственные и водноэнергетические показатели, капитальные затраты и ежегодные издержки. Указанные показатели получаются на основе соответствующих водохозяйственных и водноэнергетических расчетов.

Капитальные затраты К определяются подробными сметно-финансовыми расчетами и равны сметной стоимости К<sub>с</sub> за вычетом возвратных сумм К<sub>в</sub>.

$$K = K_c - K_v. \quad (5.12)$$

Возвратные суммы К<sub>в</sub> состояются из затрат на строительство сооружений и на приобретение строительных механизмов, которые по окончании данного строительства будут переданы

частично или полностью другим строительствам или ведомствам. К ним относится часть рабочих поселков и подсобных предприятий, железнодорожные и шоссейные подъездные пути и др., а также большинство строительных механизмов (с учетом износа). Возвратные суммы обычно составляют небольшую часть от сметной стоимости (5—7%).

Ежегодные издержки  $I$  складываются из амортизационных отчислений по гидроузлу  $I^a$ , суммарных эксплуатационных расходов по всем отраслям водохозяйственного комплекса  $\Sigma I^{эп}$  и эксплуатационных расходов по защитным мероприятиям  $I^{эм}$

$$I = I^a + \Sigma I^{эп} + I^{эм}. \quad (6.12)$$

Амортизационные отчисления, характеризующие годовой износ сооружений и оборудования и относимые на стоимость продукции водохозяйственной установки (воды или энергии), принимаются по существующим нормативам. По отдельным сооружениям они находятся в пределах от 0,48% (глухая земляная плотина) до 6,0% (плотина водосливная деревянная), а для гидромеханического оборудования (турбины, затворы и т. п.) принимаются 3,0% [9].

Эксплуатационные расходы составляют расходы по зарплате персонала, обслуживающего установку, и защитные мероприятия, на текущий ремонт сооружений и оборудования и пр. Эти расходы обычно исчисляются по нормам, выведенным из фактического опыта эксплуатации аналогичных установок. Например, по гидроэлектрическим станциям на 1 квт установленной мощности они принимаются равными [9]:

Мощность ГЭС, тыс. квт . . . . .	25	50	100	200	500	1000
Норма, руб/квт . . . . .	3,6	2,3	1,7	1,28	0,72	0,45

### Распределение капитальных затрат между отраслями народного хозяйства

Если водохозяйственная установка удовлетворяет запросы одной какой-либо отрасли народного хозяйства, например сельскохозяйственного орошения, то все затраты по созданию такой установки  $K$ , включая затраты по подготовке водохранилища, относятся на данную отрасль. При этом все же надо иметь в виду, положительное влияние водохранилища на некоторые отрасли, например на рыбное хозяйство, вследствие чего часть затрат по водохранилищу может быть отнесена на последнее.

При разрешении установкой комплекса задач общие затраты  $K$  подлежат распределению по элементам комплекса. В настоящее время еще нет единого мнения по вопросу распределения затрат по отраслям хозяйства, интересы которых удовлетворяются установкой. Обычно к распределению затрат подходят упро-

щенно, учитывая роль установки в решении тех или иных проблем. Например, при решении задач 1) борьбы с наводнениями; 2) улучшения водного транспорта и 3) энергетики на первую отрасль относятся затраты  $K_n$ , которые могли бы иметь место, если бы решалась лишь задача борьбы с наводнениями, т. е. если бы была построена только плотина, обеспечивающая создание резервной емкости водохранилища, необходимой для регулирования паводков. На водный транспорт относят затраты  $K_T$  по постройке шлюза и транспортному освоению водохранилища, на энергетику  $K_E$  — затраты по постройке ГЭС, ее гидромеханическому оборудованию и т. д. В практике проектирования применяются и другие подходы к распределению общих капитальных затрат.

В частности, распределение капитальных затрат в общий водохозяйственный комплекс между отдельными составляющими этого комплекса иногда производится по так называемому «критерию комплексной эффективности». Сущность этого критерия [9] заключается в том, что значение срока окупаемости для каждой из отраслей хозяйства, использующих воду от данной установки, принимается таким, каким получается для комплекса в целом.

Приведем пример распределения затрат по комплексному гидроузлу, решающему проблемы борьбы с наводнениями в низовьях реки, энергетики и частично водного транспорта. При этом ввиду относительно небольшого грузооборота по реке признано целесообразным судоходного шлюза не строить, а взамен него на гидроузле организовать перевалку грузов.

Основные данные гидроузла таковы:

средний годовой сток в створе плотины . . . . .	23,6 км <sup>3</sup>
максимальный напор установки . . . . .	97 м
полная емкость водохранилища . . . . .	84 км <sup>3</sup>
полезная емкость водохранилища . . . . .	52 "
в том числе резервная емкость . . . . .	12 "
установленная мощность ГЭС . . . . .	800 тыс. квт
средняя годовая выработка энергии . . . . .	4,4 млрд. квт-ч

Полные капитальные затраты по гидроузлу, составившие 240,8 млн. руб., распределены по отраслям хозяйства и по источникам финансирования следующим образом (в млн. руб.):

1. Борьба с наводнениями, включая затраты по созданию устойчивых условий для сельского хозяйства в пойме реки (специальное финансирование) . . . . . 101,1, или 42%
2. Транспортное освоение водохранилища (финансирование по линии Министерства речного флота) . . . . . 1,6, или около 1%
3. Жилищное строительство, коммунальное хозяйство, вспомогательные промышленные предприятия и пр. (финансирование по линии совнархозов и др.) . . . . . 31,9, или 13%
4. Гидроэлектростанция (финансирование по линии Министерства строительства электростанций) . . . . . 106,2, или 44%



Ежегодные издержки определились суммой  $I = 2,0$  млн. руб., в которой амортизационные отчисления составляют  $I^a = 1,58$  млн. руб., а эксплуатационные расходы  $I^{ep} = 0,42$  млн. руб. (исходя из нормы расходов на 1 кВт установленной мощности 0,53 руб.).

Отсюда себестоимость энергии получится равной [по (4.12)]

$$i_E = \frac{2,0 \cdot 10^8}{2760 \cdot 10^6} = 0,073 \text{ коп/квт-ч.}$$

С гидроэлектростанцией, технико-экономические показатели которой приведены выше, будем сопоставлять ТЭС, полностью ее заменяющую.

Заменяющая мощность ТЭС должна быть на 16% больше по сравнению с ГЭС за счет разницы в расходе на собственные нужды, большей длительности простоя тепловых агрегатов в ремонтах и т. д. и равна  $800 \cdot 1,16 = 930$  тыс. кВт. Выработка энергии ТЭС также должна быть больше вследствие разницы в расходе на собственные нужды, которые для ТЭС равны 6,5%, а для ГЭС, как указано выше, 0,5%, т. е.  $6,5 - 0,5 = 6,0\%$ , и составляет  $2,82 \cdot 1,06 = 2,98$  млрд. кВт-ч.

Технико-экономические показатели ТЭС принимаются по показателям наиболее экономичной в этом районе крупной современной тепловой электростанции с недалеко расположенной топливной базой (около 130 км). Для этой ТЭС капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности за вычетом затрат, используемых в других отраслях, определились в 78 руб., а суммарно  $78 \cdot 930 \cdot 10^3 = 72,4$  млн. руб. К этому нужно добавить затраты в топливную базу и транспорт, равные 17 млн. руб.

Таким образом, полные капитальные затраты в постройку заменяющей ТЭС составят 89,4 млн. руб.

Ежегодные издержки по ТЭС установлены в сумме 10,4 млн. руб.

Теперь мы можем подсчитать себестоимость энергии ТЭС и срок окупаемости дополнительных затрат в ГЭС:

себестоимость 1 кВт-ч энергии ТЭС, выдаваемой с шин повысительной подстанции [по (4.12)]

$$\frac{10,4 \cdot 10^8}{2760 \cdot 10^6} = 0,376 \text{ коп.,}$$

срок окупаемости [по (1.12)]

$$\frac{101,0 - 89,4}{10,4 - 2,0} = \frac{11,6}{8,4} = 1,4 \text{ года.}$$

Приведенное свидетельствует о том, что в данных конкретных условиях себестоимость энергии ТЭС в 5,2 раза выше себестоимости энергии ГЭС, и хотя затраты в последнюю превышают за-

## Определение технико-экономических показателей водохозяйственных мероприятий

Проследим на конкретных примерах порядок определения технико-экономических показателей водохозяйственных мероприятий.

**Пример из области орошения.** На существующей оросительной системе [10] удаление наносов производится обычными средствами и поэтому ежегодные издержки весьма значительны —  $I=90$  тыс. руб. С целью уменьшения поступления в систему наносов предполагается построить отстойник, затраты на который равны  $K=180$  тыс. руб. В результате ежегодные издержки на удаление наносов, включая издержки по эксплуатации отстойника, сократятся до величины  $I_0=30$  тыс. руб. Из этого следует, что затраты на постройку отстойника, согласно формуле (1.12), окупятся в очень короткий срок

$$T = \frac{180 \cdot 10^3}{(90 - 30) \cdot 10^3} = 3 \text{ года.}$$

Таким образом, постройка отстойника может быть признана выгодной.

**Пример из области гидроэнергетики.** Определим технико-экономические показатели ГЭС установленной мощностью 800 тыс. *квт* и средней годовой выработкой энергии 2,82 млрд. *квт-ч* и оценим ее эффективность по сравнению с тепловой электростанцией.

Сметная стоимость ГЭС  $K_c=143,9$  млн. руб. Полные капитальные вложения за вычетом возвратных сумм  $K_b=9,6$  млн. руб. равны  $K=134,3$  млн. руб., в том числе на энергетику отнесено  $K_s=101,0$  млн. руб., или 75%.

Отсюда удельные затраты равны [по (3.12)]:  
на 1 *квт* установленной мощности

$$K_N = \frac{101,0 \cdot 10^6}{800 \cdot 10^3} = 126,5 \text{ руб.,}$$

на 1 *квт-ч* выработки энергии

$$K_E = \frac{101,0 \cdot 10^6}{2820 \cdot 10^6} = 0,036 \text{ руб.}$$

Для определения себестоимости 1 *квт-ч* энергии, помимо ежегодных издержек, необходимо знать годовую выработку энергии, выдаваемую с ГЭС в энергосистему. Последняя равна общей выработке за вычетом выработки, расходуемой на собственные нужды электростанции (0,5%), и потерь в повысительной подстанции (1,5%), а всего 2%, т. е.  $2820 \cdot 10^6 \cdot 0,98 = 2760 \cdot 10^6$  *квт-ч*.

траты по ТЭС на 11,6 млн. руб., или на 13%, строительство ГЭС вполне оправдывается, так как дополнительные затраты окупаются в очень короткий срок — 1,4 года.

В практике отечественного строительства гидроэлектростанций имеется много примеров, когда дополнительные затраты окупаются за срок не более одного года, что указывает на абсолютную эффективность постройки ГЭС в подобных случаях. Имеются, однако, примеры обратного порядка, когда в силу местных условий — геологических, топографических, значительных затоплений, наличия вблизи дешевого топлива и др., энергия ГЭС получается дороже энергии ТЭС. В подобных случаях строительство ГЭС становится неэффективным. Начатое на Урале строительство Зюраткульской ГЭС установленной мощностью 14 тыс. квт было законсервировано, так как ее технико-экономические показатели оказались выше показателей заменяющей тепловой электростанции — удельные затраты 610 руб/квт и 0,164 руб/квт-ч, а себестоимость энергии — 0,62 коп/квт-ч [11].

Нужно иметь в виду, что в связи с прогрессом техники строительства и его удешевлением установки, неэкономичные в настоящее время, могут стать эффективными в будущем. На это указывает тот факт, что за предыдущее семилетие, закончившееся в 1958 г., удельные капитальные затраты на установленный киловатт мощности гидроэлектростанций составляли в среднем по СССР 348 руб., а на проектируемых и строящихся гидроэлектростанциях текущего семилетия (1959—1965 гг.) они снизятся до 178 руб. (из выступления Министра строительства электростанций СССР тов. Новикова И. Т. на XXI съезде КПСС).

Ниже приводятся данные (табл. 1.12) по некоторым построенным, строящимся и проектируемым ГЭС от наиболее круп-

Таблица 1.12

ГЭС	Река	Напор, м	Установленная мощность, тыс. квт	Средняя годовая выработка энергии, млрд. квт-ч	Себестоимость энергии, коп./квт-ч
Нурекская . . . . .	Вахш	250	2700	11,8	0,030
Красноярская . . . . .	Енисей	101	5000	20	0,030
Братская . . . . .	Ангара	102	4500	21,7	0,040
Волжская им. В.И. Ленина	Волга	24	2300	10,5	0,080
Горьковская . . . . .	"	13	400	1,40	0,27
Каменская . . . . .	Обь	25	630	2,62	0,146
Рыбинская . . . . .	Волга	18	330	1,00	0,34
Пермская . . . . .	Кама	19	504	1,80	0,22
Порогская . . . . .	Суда	12	4	0,02	0,670
Дружининская . . . . .	Кокшеньга	8	2	0,01	0,920

ных до очень мелких, характеризующие показатели народнохозяйственной эффективности их строительства. Следует отметить, что удельные показатели (здесь не приводятся) и себестоимость энергии, как правило, уменьшаются с увеличением мощности и отдачи энергии ГЭС.

Приведенные данные показывают, что на современных крупных гидроэлектростанциях себестоимость киловатт-часа электроэнергии, как правило, не превышает одной десятой копейки, а на наиболее эффективных из них составляет около 0,03—0,06 коп. (Нурекская и др.). В то же время на строящихся крупных тепловых электростанциях мощностью 1200—2400 тыс. кВт в зависимости от вида топлива и способов его добычи себестоимость энергии будет составлять не менее 0,2—0,4 коп. за киловатт-час.

### Л и т е р а т у р а

1. Лифанов И. А. Организация чаши водохранилища (затопление и подтопление в гидротехническом строительстве). Госэнергоиздат, М., 1946.
2. Богатырев В. В. Инженерная защита в зонах водохранилищ крупных гидроэлектростанций. Госэнергоиздат, М., 1958.
3. Кудрин Н. И. О сельскохозяйственном использовании мелководных зон водохранилищ. Гидротехника и мелиорация, № 7, 1957.
4. Макавеев Н. И. Русловой режим больших равнинных рек, зарегулированных водохранилищами ГЭС. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. V. Гидрометеиздат, Л., 1959.
5. Серебряков А. В. Гидрологические особенности Нижнего Дона после зарегулирования его стока Цимлянским водохранилищем. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. V, Гидрометеиздат, Л., 1959.
6. Бахтиаров В. А. Изменение гидрологического режима среднего течения р. Иртыша под влиянием многолетнего регулирования стока. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. VI, Гидрометеиздат, Л., 1959.
7. Марголин А. Б. Экономическая оценка ущерба от наводнений в бассейне верхнего и среднего Амура. Сб. «Перспективы использования гидроэнергии и борьба с наводнениями в бассейне верхнего и среднего Амура», изд. АН СССР, 1959.
8. Вознесенский А. Н. и Бесчинский А. А. Гидроэнергетические ресурсы СССР и народнохозяйственное значение их использования. Гидротехническое строительство, № 11, 1957.
9. Инструкция по определению экономической эффективности гидроэлектростанций (основные положения). Госэнергоиздат, 1958.
10. Зулик Д. Т. Система технико-экономических показателей для обоснования проектов мелиоративного строительства. Гидротехника и мелиорация, № 6, 1957.
11. Степанков А. А. Основные вопросы экономики гидроэнергетики. Госэнергоиздат, М., 1956.
12. Кусков Л. С. Водное хозяйство гидроэлектростанций. Госэнергоиздат, М., 1954.
13. Кондратьев Н. Е. Расчеты береговых переформирований на водохранилищах (практическое пособие). Гидрометеиздат, Л., 1960.

Таблица 1

вспеченности от середины (от 1.0) при  $C_v = 1.0$

вспеченности

Отклонения ординат биномиальных асимметричных кривых	Процент												
	40	30	25	20	10	60	70	75	80	90	95	97	99
0	0,25	0,00	0,25	0,52	0,67	0,84	1,28	1,64	1,88	2,33	3,09		
0,1	0,24	0,02	0,26	0,54	0,68	0,85	1,27	1,62	1,84	2,25	2,95		
0,2	0,22	0,03	0,28	0,55	0,69	0,85	1,26	1,59	1,79	2,18	2,81		
0,3	0,21	0,05	0,30	0,56	0,70	0,85	1,24	1,56	1,75	2,10	2,67		
0,4	0,19	0,07	0,31	0,57	0,71	0,86	1,23	1,52	1,70	2,03	2,53		
0,5	0,17	0,08	0,33	0,58	0,71	0,86	1,21	1,49	1,66	1,95	2,40		
0,6	0,16	0,10	0,34	0,59	0,72	0,86	1,20	1,46	1,61	1,88	2,27		
0,7	0,14	0,12	0,36	0,60	0,72	0,86	1,18	1,42	1,56	1,81	2,14		
0,8	0,12	0,13	0,37	0,60	0,73	0,86	1,17	1,39	1,52	1,73	2,02		
0,9	0,10	0,15	0,38	0,61	0,73	0,85	1,15	1,35	1,47	1,66	1,90		
1,0	0,09	0,16	0,39	0,62	0,73	0,85	1,13	1,32	1,42	1,59	1,79		
1,1	0,07	0,18	0,41	0,62	0,73	0,85	1,11	1,28	1,38	1,52	1,68		
1,2	0,05	0,20	0,42	0,63	0,74	0,84	1,09	1,24	1,33	1,45	1,58		
1,3	0,04	0,21	0,43	0,64	0,74	0,83	1,06	1,21	1,28	1,38	1,48		
1,4	0,02	0,22	0,44	0,64	0,74	0,83	1,04	1,17	1,23	1,32	1,39		
1,5	0,00	0,24	0,45	0,64	0,73	0,82	1,02	1,13	1,18	1,26	1,32		
1,6	0,02	0,25	0,46	0,64	0,73	0,82	0,99	1,09	1,14	1,20	1,24		
1,7	0,03	0,27	0,47	0,64	0,72	0,81	0,97	1,06	1,10	1,14	1,17		
1,8	0,05	0,28	0,48	0,64	0,72	0,80	0,94	1,02	1,05	1,09	1,11		
1,9	0,07	0,29	0,48	0,64	0,72	0,79	0,92	0,98	1,01	1,04	1,05		
2,0	0,08	0,31	0,49	0,64	0,71	0,78	0,90	0,95	0,98	0,99	1,00		
2,1	0,11	0,33	0,49	0,63	0,69	0,75	0,85	0,90	0,90	0,90	0,91		
2,2	0,14	0,35	0,50	0,62	0,66	0,71	0,79	0,82	0,82	0,83	0,83		
2,3	0,17	0,37	0,50	0,60	0,64	0,68	0,74	0,76	0,76	0,77	0,77		
2,4	0,20	0,38	0,50	0,59	0,62	0,65	0,70	0,71	0,71	0,71	0,71		
2,5	0,23	0,40	0,50	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67		
2,6	0,23	0,40	0,50	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67		
2,7	0,23	0,40	0,50	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67		
2,8	0,23	0,40	0,50	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67		
2,9	0,23	0,40	0,50	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67		
3,0	0,23	0,40	0,50	0,57	0,60	0,62	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67		

Ординаты биномиальных асимметричных

Таблица I

Значение

97	99	99,9
1,00	1,00	1,00
0,89	0,85	0,85
0,78	0,72	0,72
0,67	0,60	0,60
0,59	0,49	0,49
0,51	0,40	0,40
0,44	0,32	0,32
0,37	0,25	0,25
0,31	0,19	0,19
0,25	0,15	0,15
0,21	0,11	0,11
0,17	0,08	0,08
0,13	0,05	0,05
0,10	0,04	0,04
0,08	0,02	0,02
0,06	0,05	0,05
0,06	0,10	0,10
0,03	0,06	0,06
0,02	0,03	0,03
0,01	0,02	0,02

*Бахтияров Виктор Андреевич*  
ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ  
РАСЧЕТЫ

Отв. редактор *В. Г. Андреев*

Редактор *М. К. Шатилина*

Техн. редакторы: *А. А. Соловейчик* и *М. И. Брайнина*  
Корректоры: *Ф. И. Межиковская* и *К. И. Розина*

Сдано в набор 24/IV 1961 г. Подписано к печати  
18/IX 1961 г. Бумага 60 × 90<sup>1/16</sup> Бум. л. 13,5.  
Печ. л. 27. Уч.-изд. л. 26,77. Тираж 6000 экз.  
М-63795. Индекс ГЛ-240.

Гидрометеорологическое издательство. Ленинград,  
В-53, 2-я линия, д. № 23

Заказ № 249

Цена 1 р. 9 к.

---

Типография № 8  
Управления полиграфической промышленности  
Ленсовнархоза  
Ленинград, Прачечный пер., д. № 6.

---

---

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО**

**Отдел распространения**

**Ленинград, В-53, 2-я линия, дом № 23**

**ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ**

**Учебники для вузов**

- Алехин Ю. М. Краткосрочные прогнозы стока на равнинных реках. 89 к.  
Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. Гидрологические прогнозы. 1 р. 04 к.  
Белобров А. П. Фазовые и радионавигационные системы в гидрографии и океанологии. 56 к.  
Гирс А. А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. 1 р. 56 к.  
Качурин Л. Г. Руководство к лабораторным работам по метеорологии. 1 р. 20 к.  
Костин С. И. Основы метеорологии и климатологии. 1 р. 20 к.  
Лайхтман Д. Л. Задачник по динамической метеорологии. 69 к.  
Соколовский Д. Л. Речной сток. 1 р. 67 к.  
Чеботарев А. И. Общая гидрологии. 1 р. 49 к.  
Шамов Г. И. Речные наносы (режим, методы измерений и расчеты). 1 р. 14 к.  
Шулейкин В. В. Краткий курс физики моря. 1 р. 86 к.

***Требуйте книги в магазинах книоторгов!***

**ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ**

---

---