Я.Ф. ПЛЕШКОВ

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Я. Ф. ПЛЕШКОВ

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Издание третье, исправленное и дополненное



ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД • 1975

УДК 556.16+556.18

Книга содержит основы теории и практические приемы водохозяйственных расчетов и регулирования речного стока для водоснабжения, ирригации, гидроэлектростанций, тепловых энергоустановок и других водопользователей. Освещаются расчеты основных параметров водохранилищ, а также правила управления их работой в эксплуатации с наиболее целесообразным использованием стока (по диспетчерским графикам). Рассматриваются влияние изменений гидрологических параметров на отдачу водохранилищ, минерализация воды в них и расчеты накопителей промышленных сточных вод для охраны водных объектов. Излагаются также принципы регулирования половодий и паводков.

В третьем издании дополнительно освещены следующие вопросы: асинхронность осадков за вегетацию и стока рек, компенсирующее регулирование стока, каскад водохранилищ, трансформация паводков, опреснение водоемов ГРЭС, накопители сточных вод для охраны рек и др.

Для замены сложных и трудоемких расчетов в книге приведены расчетные графики, номограммы, таблицы. Показаны практические данные по эксплуатации водохранилищ.

Книга предназначена для инженеров-проектировщиков, научных работников и специалистов, занимающихся эксплуатацией водохозяйственных установок, и может быть также учебным пособием для студентов гидрологических и гидротехнических факультетов.

The book comprises principles and technique of water economy calculations; river runoff control; water supply and irrigation of hydropower houses, heat energy sets and other water consumers. Calculation of the major water reservoir parameters and the most effective use of runoff in water reservoir control (by means of individual plots) is discussed. The effects of hydrological parameters changes upon water reservoir yield, water mineralization and account of these changes in sewage storages calculations in view of water bodies protection are considered. Elements of flood control are also presented.

The questions of precipitation asynchronism during the vegetative period, compensative runoff control, cascade of reservoirs, flood transformation, water-freshening of hydropower houses reservoirs, sewage storages in view of river protection are revealed in the third edition of the book.

The book contains plots, tables and nomograms, which the make calculations less tedious.

This volume may be useful for designers, sientists and those in charge of maintaining water economy sets. It could serve also a manual for students of hydrology.

П $\frac{20806\text{-}052}{069(02)\text{-}75}$ 48-75

© Гидрометеоиздат, 1975 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Водные объекты во всем их многообразии (реки, озера, моря и др.) с древнейших времен оказывают большое влияние на развитие человеческого общества. В одних случаях, когда стихийность режима природных вод (наводнение, обмеление, пересыхание рек) наносила тяжелые разрушения или вызывала бедствия, это влияние было тормозящим, в других — водные объекты благоприятствовали развитию ирригации, торговых отношений и т. п.

Постепенно приспосабливаясь к существующим водным условиям, человечество стало активно воздействовать на режим природных вод применительно к своим потребностям.

Технический уровень гидротехнических мероприятий в различные эпохи отражал развитие производительных сил. Освоение рек и озер, происходившее во многих случаях наряду со строительством каналов и других гидросооружений, издавна играло важную роль в жизни нашей страны.

Наибольших масштабов использование водных ресурсов достигло в эпоху построения социализма и коммунизма в СССР. Ныне водохозяйственные мероприятия (с применением целесообразно направленного изменения режима водных объектов), носящие комплексный характер, в состоянии существенно влиять на географию страны. Они являются важной составной частью планов преобразования природы.

Влияние величайших гидротехнических строек на Волге, Днепре, Дону, в степях и пустынях сказывается на громадных территориях. Строительство водохранилищ для водоснабжения, орошения, тепловых электростанций и гидростанций на средних и малых реках приняло массовый характер.

В научном и водохозяйственном обосновании гидротехнических мероприятий особое место занимают гидрология и совсем молодая отрасль науки — теория регулирования и использования речного стока.

Значительную роль в развитии гидрологии сыграли работы русских ученых А. И. Воейкова, Е. В. Оппокова, Е. Ольдекопа, Н. Е. Долгова, Е. А. Гейнца, Н. И. Соколова и др. Особенно

велики достижения гидрологии после Великой Октябрьской социалистической революции. Трудами советских ученых М. А. Великанова, Б. В. Полякова, Д. Л. Соколовского, С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля, А. В. Огиевского и других гидрология и теория регулирования стока из описательных дисциплин превратились в мощное орудие подчинения водной стихии многообразным потребностям нашей Родины.

В данной работе изложены основы водохозяйственных расчетов и практических приемов регулирования речного стока применительно к различным отраслям народного хозяйства.

Во втором издании были развиты следующие разделы: водопотребление, его обеспеченность; потери воды из водоемов и русла; расчеты водохранилищ (по гидрометрическим рядам, при работе в каскаде, для водоотдачи по двум обеспеченностям); расчеты диспетчерского регулирования стока и др. Освещены также вопросы, не затрагивавшиеся в первом издании, а именно: грунтовый водообмен как регулятор речного стока, расчеты регулирования стока по принципу компенсации; сокращенно изложены сведения по основам оптимизации при решении водохозяйственных задач (с применением ЭВМ) и другие смежные вопросы.

В третьем издании, кроме исправления опечаток предыдущего издания, дополнена теория расчета каскада водохранилищ, компенсирующего регулирования стока, расчета накопителей — испарителей сточных вод, трансформации половодий водохранилищем и др.

Автор приносит благодарность всем лицам, способствовавшим улучшению книги, ускорению ее издания, и с должным вниманием примет замечания по ее изложению и содержанию.

Глава I

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ И РЕЧНОМ СТОКЕ

§ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Значение воды. Водные ресурсы СССР и их использование

В хозяйственной деятельности людей вода находит применение:

— как ничем не заменимое физическое вещество (или сырье) для питья и бытовых потребностей населения, для сельскохозяйственного орошения и содержания животных на фермах и пастбищах, для изготовления многочисленных фабрично-заводских изделий и обеспечения технологических процессов производства (охлаждение оборудования и т. п.);

— как среда, необходимая для рыбоводства, водного транспорта, спортивно-оздоровительных нужд, архитектурно-декоративных целей;

— как масса, используемая (при создании перепада уровней воды) для получения механической энергии, почти во всех случаях преобразуемой в электрическую.

По отношению к воде человеческая деятельность проявляется также в борьбе с избытками воды, вызывающими наводнения, заболачивание земель и т. п.

Испытывая потребность в воде, наши соотечественники издавна строили плотины, мельницы, каналы, промышленные водносиловые установки, водохранилища. В летописи гидротехнического строительства Советского Союза немало примеров изобретательности [31].

Наша страна занимает одно из первых мест по богатству водных и водноэнергетических ресурсов (табл. 1) [20, 111].

Однако для более полного представления о водных ресурсах территории СССР следует охарактеризовать их по зонам [111] (табл. 2) и по республикам (табл. 3).

К зоне высокой водообеспеченности относится почти половина страны: в основном это северная часть ЕТС и почти вся Азиатская территория РСФСР. Здесь избыток воды приводит к образованию болот и заболоченных земель. Но в районах распространения сплошной многолетней мерзлоты зимой, при промерзании рек, также наблюдается острый недостаток воды.

В зоне средней водообеспеченности водные ресурсы в целом достаточны для удовлетворения запросов народного хозяйства.

Но в крупных промышленных районах [Центральный экономический район (включая Подмосковье), ЦЧО, Промышленный Урал и другие районы, удаленные от крупных рек] и городах нередко образуется дефицитный водохозяйственный баланс.

Таблица 1

Суммарные и удельные водные ресурсы СССР и других стран за средний по водности год

Страна	Суммарные водные ресурсы, км³	Средние удельные водные ресурсы	
		тыс. м³/год·км²	л/с·км²
СССР	4384	196	6,2
Бразилия	3200	380	12,0
США	2850	365	11,5
КНР	2600	260	8,3
Норвегия	366	1134	36,0
Франция	343	441	14,0
Швеция	170	378	12,0

Таблица 2

Зоны СССР по степени водообеспеченности за средний по водности год

Зона водообеспеченности	Норма стока, л/с·км²	Площадь зоны, %	Водные ресурсы зоны	
			км³	% от общих ресурсов
Высокой	>6	48	3484	80
Средней	от 6 до 2	25	780	18
Низкой и очень низкой	<2	27	120	2

К зоне низкой водообеспеченности, занимающей более четверти территории и имеющей только 2% общих ресурсов страны, относятся: Молдавия, юг Украины, степи Крыма, Донбасс, Ставропольский край, Заволжье и Нижнее Поволжье, Казахстан, Туркмения и другие густонаселенные районы с развитой промышленностью и интенсивным сельским хозяйством. Наиболее бедны водными ресурсами Туркмения, Казахстан, Узбекистан, Молдавия, крупные районы УССР, РСФСР и других республик. Низкая водообеспеченность (табл. 3) в действительности бывает еще более низкой в связи с неравномерностью распределения стока в пределах республик, а также изменчивостью стока по годам и в пределах года [20, 21, 97].

Аналогичная картина наблюдается и в гидроэнергетических ресурсах. По общим запасам гидроэнергии СССР занимает первое

Таблица 3

Водные ресурсы рек СССР и союзных республик за средний по водности год

Республика	Площадь, тыс. км²	Население, тыс. чел. (на 1970 г.)	Водные ресурсы					
			формирующиеся в пределах республики				поступающие из сопредельных районов, км³	суммарные, км³
			годовой объем, км³	% от общих ресурсов	тыс. м³ на 1 км²	тыс. м³ на 1 чел.		
РСФСР	17 075	130 079	4003	91,3	234	30,8	194	4197
Украинская	601,0	47 126	49,9	1,1	83	1,1	159	209
Молдавская	33,7	3 569	0,811	—	24	0,2	10,6	11,4
Белорусская	207,6	9 002	36,4	0,8	175	4,0	21,3	57,7
Эстонская	45,1	1 356	11,7	0,3	260	8,6	0,09	11,8
Латвийская	63,7	2 364	17,1	0,4	268	7,2	18,3	35,4
Литовская	65,2	3 128	15,3	0,4	235	4,9	11,0	26,3
Грузинская	69,7	4 686	53,6	1,2	770	11,5	9,2	62,8
Азербайджанская	86,6	5 117	8,71	0,2	100	1,7	21,9	30,6
Армянская	29,8	2 492	6,50	0,1	218	2,6	1,38	7,88
Казахская	2 715,1	12 849	64,8	1,5	24	5,0	56,3	121
Узбекская	449,6	11 960	11,1	0,3	25	0,9	106	117
Киргизская	198,5	2 933	52,8	1,2	265	18,0	0	52,8
Таджикская	143,1	2 900	51,2	1,2	358	17,7	20,0	71,2
Туркменская	488,1	2 159	1,0	—	2	0,5	67,6	68,6
Всего по СССР	22 272	241 720	4384	100	196	18,1	697 *	4714

* В том числе 330 — воды, поступающие из зарубежных стран, из них 123 км³ на территорию Украинской ССР по р. Дунай.

Примечание. Запасы пресных подземных вод в СССР оцениваются, по неполным данным, в 210 км³/год, из которых только 45% объема ежегодно восполняется. При этом наибольшие ресурсы приходятся на Западную Сибирь, Центральный и Северо-Западный районы, республики Закавказья, а также Узбекистан, Украину и Белоруссию [88].

место в мире, а по запасам на душу населения — четвертое место после Канады, Норвегии и Швеции. По общему производству гидроэнергии СССР занимает второе место, а в ближайшие годы перейдет на первое. Однако по относительному освоению наличных запасов гидроэнергии нашу страну пока еще опережают другие страны мира (табл. 4), в частности те, которые стеснены в иных источниках энергии (уголь, нефть и пр.).

Таблица 4

Гидроэнергетические ресурсы [3] и их использование. 1965 г.

Страна	Экономические ресурсы, млрд. кВт·ч	Использование гидроэнергоресурсов за год	
		млрд. кВт·ч	%
СССР	1095	81,4 (123 *)	7,4 (≈11 *)
США	648	197	30,4
Канада	218	117	53,7
Япония	130	73	56,1
Норвегия	105	48,8	46,5
Швеция	85	46,4	54,6
Франция	76	46,4	61,1
Италия	60	42,8	71,3

* Данные 1970 г.

Неравномерность распределения гидроэнергии по союзным республикам видна из данных табл. 5. Наиболее богаты запасами гидроэнергии РСФСР, Таджикская, Грузинская и Киргизская ССР; на плоских пространствах прибалтийских республик, Белоруссии и Молдавии запасы незначительны.

Различают следующие виды гидроэнергоресурсов.

Потенциальные энергоресурсы — теоретические запасы энергии рек (3338 млрд. кВт·ч), подсчитанные по формуле

$$Э = 8760 \sum 9{,}81 \cdot 0{,}5 (Q_i' + Q_i'') H_i,$$

где Q_i', Q_i'' — средние годовые расходы воды (начальный и конечный), м³/с; H_i — падение реки по участкам деления всей длины потока, м.

Технические энергоресурсы учитывают потери:

а) в расходах воды: часть ее теряется на испарение, фильтрацию и утечки через различные затворы;

б) в напорах: гидравлические — в водоводах и, кроме того, часть падения рек (самые верховья и приустьевые участки) практически не может быть использована;

в) электромеханические потери, учитываемые значениями к. п. д. турбин и генераторов. При этом в целом по стране может быть освоено лишь 63%, т. е. 2106 млрд. кВт·ч.

Таблица 5

Распределение гидроэнергетических ресурсов крупных и средних рек за средний по водности год [24]

Республика	Потенциальные гидроэнергоресурсы за средний год				Технически возможные к использованию ресурсы, млрд. кВт·ч	Экономические гидроэнергоресурсы	
	мощность, млн. кВт	млрд. кВт·ч				млрд. кВт·ч	% от потенциальных ресурсов
		на 1 км²	на 1 чел.	всего			
РСФСР	273,4	140	19,1	2395	1670	852,0	35,0
Украинская	4,8	70	0,9	42	21	17,0	40,5
Молдавская	0,2	56	0,6	2	1,2	0,7	35,0
Белорусская	0,7	29	0,7	6	3,1	0,9	15,0
Эстонская	0,07	16	0,5	1	0,5	0,05	—
Латвийская	0,7	99	2,8	6	4,0	3,9	65,0
Литовская	0,5	69	1,5	5	2,8	2,2	44,0
Грузинская	15,5	1947	30,3	135	68	32,0	23,5
Азербайджанская	4,2	429	8,2	37	16	7,0	19,0
Армянская	2,1	625	8,7	19	8,6	6,0	31,5
Казахская	18,6	52	12,0	163	62	27,0	19,0
Узбекская	9,6	178	7,9	84	27	11,0	14,0
Киргизская	15,5	683	52,8	136	73	48,0	35,0
Таджикская	32,6	1972	113,8	286	144	85,0	30,0
Туркменская	2,5	45	11,9	22	4,8	1,7	7,5
Итого по СССР	381	149	14,4	3338	2106	1095	

Примечание. Потенциальные гидроэнергоресурсы малых рек составляют дополнительно около 15% (в целом по СССР).

Экономические энергоресурсы (1095 млрд. кВт·ч) — часть технических ресурсов, которую в свете современных экономических условий и уровня техники целесообразно использовать в обозримой перспективе, что выявляется путем обобщения проектных материалов.

В настоящее время в нашей стране освоено примерно 11% экономически выгодных гидроэнергоресурсов. Общеизвестны крупнейшие каскады гидростанций и уникальные ГЭС на Волге, Каме, Днепре, Дону, Свири, Ангаре, Оби, Иртыше, Сырдарье, Куре, Раздане и многих других реках с мощностями от нескольких десятков тыс. квт (Волховская ГЭС) до нескольких млн. квт на уже существующих и строящихся гидростанциях в бассейнах рек Енисея и Вахша.

Больших размеров достигло и развитие ирригации в СССР. Орошение и обводнение поглощают более половины потребляемой в СССР воды. Значительное количество воды идет на обводнение пустынных пастбищ (из 292 млн. га обводнено 200 млн. га, главным образом за счет колодцев).

Состояние ирригации в 1965 г. иллюстрируют данные табл. 6.

Таблица 6

Распределение оросительных площадей по республикам (тыс. га), по данным работы [24]

Республика	Наличие земель с оросительной сетью	Использовано орошаемых земель	Полито ирригационно подготовленных земель	Республика	Наличие земель с оросительной сетью	Использовано орошаемых земель	Полито ирригационно подготовленных земель
Узбекская . . .	3179	2620	2492	Армянская . . .	258	233	187
Туркменская . . .	904	514	513	Грузинская . .	355	344	232
Таджикская . .	473	437	423	РСФСР	1 832	1458	1176
Киргизская . .	1095	840	791	Украинская . .	514	496	402
Казахская . . .	1823	1146	985	Молдавская . .	75	67	51
Азербайджанская	1599	1116	953				
				Всего по СССР	12 107	9270	8205

Кроме того, наряду с регулярным применяется лиманное орошение: по стране насчитывается свыше 1 млн. га лиманов, из них в 1965 г. было залито 543 тыс. га (почти все в Казахской ССР).

На площадь в 1 млн. га вода подается насосами, на остальную площадь — самотеком. Около 200 тыс. га (преимущественно на Украине) поливается с помощью дождевальных машин.

Данные табл. 6 показывают, что наблюдается существенный разрыв между завершением ирригационного строительства и сельскохозяйственным освоением поливных земель.

В районах орошения предстоят также большие работы по реконструкции оросительных систем, по значительному увеличению площади орошаемых земель.

Коммунальное хозяйство и промышленность — второй по размерам, но наиболее ответственный потребитель воды. Централизованным водоснабжением в СССР обеспечено 40% населения с подачей на одного жителя в среднем 155 л в сутки (1966 г.). Водопроводы построены более чем в 3800 населенных пунктах.

В области водохозяйственного строительства выполнены работы большей частью комплексного назначения. В частности, построены каналы:

а) для водоснабжения: Волга—Москва (им. Москвы), Северский Донец—Донбасс, Днепр—Кривой Рог, Волга—Уводь (для г. Иваново), Самур—Дивиченский (для г. Баку), Иртыш—Караганда и др.

б) для ирригации: в Средней Азии — Ферганский, Аму-Бухарский, Каракумский и другие; на Северном Кавказе — Кумско-Терский, Невинномысский, Манычский, Донской им. В. И. Ленина, Алханчурский и др., в Закавказье — Самгорский, Ширванский, Верхний и Нижний Карабахские и др.; на Украине — Краснознаменский, Северо-Крымский, Ингулецкий и др.;

в) для водного транспорта: Тихвинский, Беломорско-Балтийский, Волго-Балтийский (вместо старой мелководной Мариинской

системы), Волго-Донской и ряд других каналов (Березинский, Днепро-Неманский, Днепро-Бугский, Волго-Северодвинский и др.), объединивших в единую систему бóльшую часть внутренних водных путей Европейской территории СССР. Общая протяженность эксплуатируемых судоходных путей на 1970 г. составляла 145 тыс. км, лесосплавных путей — 142 тыс. км.

Схемы использования водных ресурсов. Понятие о водохозяйственной установке

К настоящему времени водное хозяйство нашей страны достигло такого уровня, когда использование водных ресурсов крупных регионов рассматривается с точки зрения водного баланса всей страны. Соответственно этому составлена Генеральная схема использования и охраны водных ресурсов СССР, в которой освещены возможности решения водохозяйственных проблем в пределах больших районов. Предполагается осуществить:

а) перераспределение водных ресурсов в географическом пространстве (переброску стока северных рек в южные засушливые зоны, межрайонные переброски стока по каналам и водоводам длиной в несколько сот километров, например, канал Иртыш—Караганда);

б) регулирование стока крупных рек;

в) использование подземных запасов;

г) мероприятия по охране вод от загрязнения и т. п.

Упомянутая Генеральная схема является основой для решения порайонных водохозяйственных проблем, которые также требуют предварительной разработки побассейновых или региональных схем использования водных ресурсов. Существуют, например, схемы водоснабжения Донбасса, Подмосковья и др. В таких случаях схема гидростроительства составляется для всего бассейна реки или даже для нескольких бассейнов. При этом учитываются все отрасли водного хозяйства в пределах бассейна (коммунальное и промышленное водопотребление, ирригация и осушение, гидроэнергетика, водный транспорт, рыбоводство, борьба с наводнениями и т. д.) в настоящее время и на отдаленный период.

Необходимость учета будущего использования водотока соответствует плановым основам развития нашей страны и особенно четко проявляется при крупном гидростроительстве: непредусмотренная заранее стройная система и последовательность в использовании водотока могут привести к неудачным решениям, излишним затратам, неудобствам водопользования и эксплуатации сооружений.

С течением времени обнаруживается, что плотину очередной установки нужно расположить в створе, которого не достигает подпор от существующей ниже лежащей ГЭС. В результате чего часть падения реки гидростанцией не используется, возникают затруднения для водного транспорта и т. п. Этого можно было бы избежать, если бы к моменту строительства ниже лежащей ГЭС

была составлена схема использования водотока. Такая схема представляет собой каскад водохозяйственных установок по длине реки, увязанных между собой по высоте подпора с учетом его изменений (сработки) при эксплуатации каждой установки (рис. 1).

Местоположение подпорных сооружений, высоты которых при этом (кроме самой верхней) определяются взаимным подпором отдельных ступеней, выбирается на основе топографических, геологических, экономических, гидрологических и других условий.

По топографической характеристике местности определяется длина плотины, емкость чаши водохранилища, площадь затопления земель и т. п. Створы гидроузлов располагают так, чтобы не затапливать населенные пункты, ценные сооружения и залежи, чтобы плотины с большим напором не размещались слишком близко к населенным пунктам и предприятиям, находящимся в нижнем бьефе на низких отметках.

Геологические данные также играют важную роль при выборе места каждого сооружения, так как от них в значительной мере зависит высота плотины, соответствующая необходимой величине подпора. Горные породы различаются по строительным качествам — предельной нагрузке на основание и фильтрационным свойствам, чем определяется тип сооружения, его размеры, мероприятия по борьбе с фильтрацией и т. д.

Гидрологические и водохозяйственные условия имеют значение для распределения водных ресурсов (притоков) по отдельным ступеням каскада в зависимости от размещения плотин и получаемых при этом выгод по количеству воды или энергии для отдельных ступеней.

Между установками соблюдается минимальное подтопление, обеспечивающее необходимые горизонты для нормального забора воды всех водопотребителей, достаточные глубины на судоходных реках и наиболее эффективное использование водных ресурсов каждой ступени (с учетом форсировки уровней в половодье и падения их при сработке водохранилищ).

Экономические условия означают сопоставление выгод, получаемых от той или иной установки, и затрат на ее сооружение и компенсацию возникающих при этом затоплений и подтоплений населенных мест, предприятий, железных дорог, сельскохозяйственных угодий и т. п.

При размещении гидроузлов учитываются также общие строительные условия, удобства местности, наличие поселков, дорог, строительных материалов, линий электросвязи и т. д.

Обычно схема использования водотока разрабатывается в нескольких вариантах при различном расположении гидроузлов, различном их числе, а значит и размерах. При этом отдельные створы смещаются вверх или вниз по реке, некоторые из них выбрасываются и перекрываются подпором одной установки, расположенной ниже, и т. п.

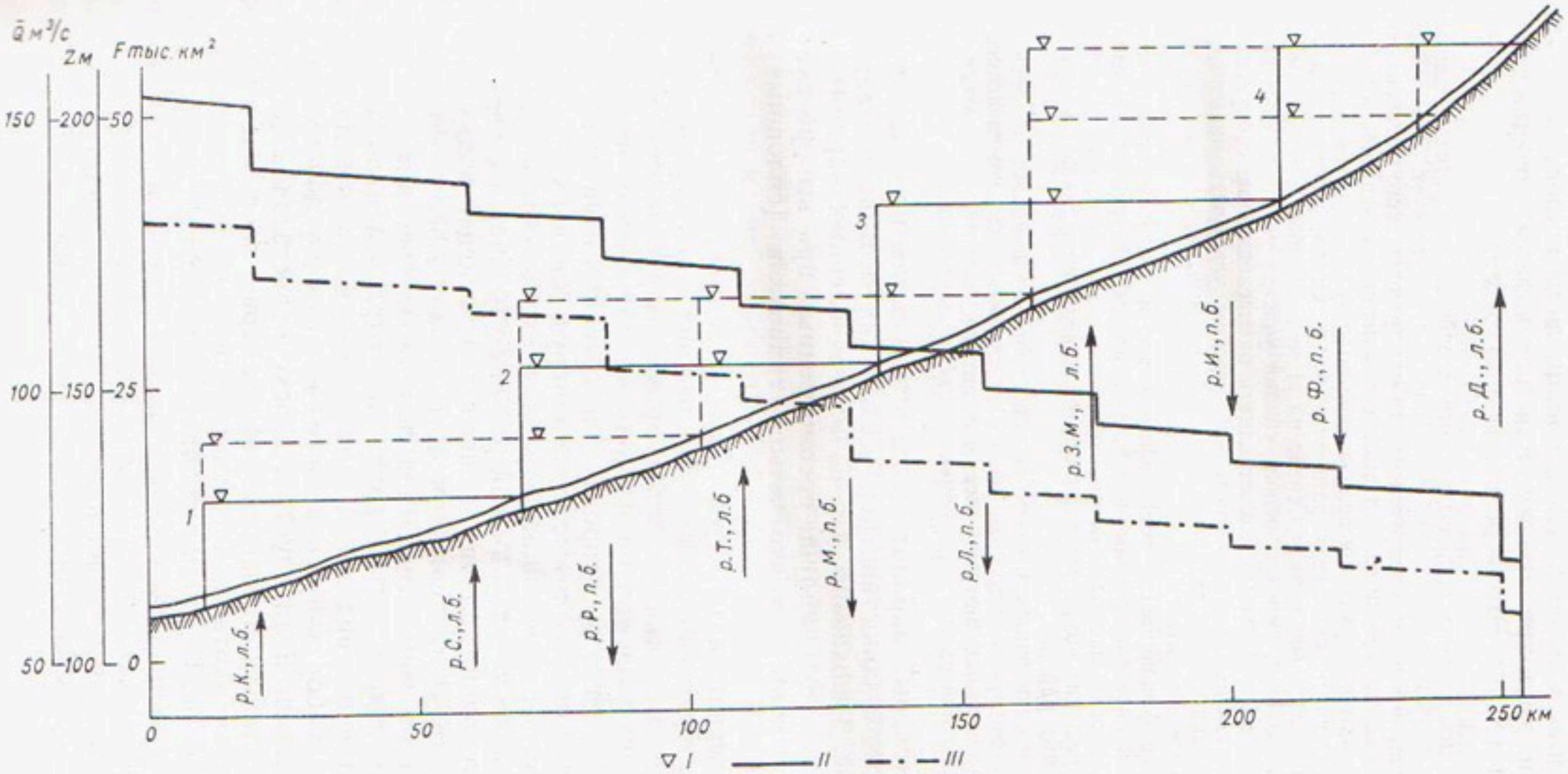


Рис. 1. Схема использования реки.

I — отметки НПГ по вариантам створов плотин, *II* — график нарастания водосборной площади, *III* — график нарастания нормы стока; *1*, *2*, *3*, *4* — водохранилища выбранного варианта использования реки.

В сложных условиях использование водных ресурсов рассматривается по двум-трем рекам или источникам (озерам, подземным водам и т. п.). Это — региональная схема.

В отдельных случаях вопросы водного хозяйства решаются независимо от того, имеется схема использования реки или она отсутствует. Это допускается обычно для рек, не имеющих энергетического или транспортного значения, а также в случаях, когда по наличным условиям сооружение намечаемой установки не может влиять на последующее использование водотока.

Так, Краснооскольское водохранилище на р. Оскол, служащее для водоснабжения Донбасса (по каналу Северский Донец—Донбасс), построено как самостоятельный объект, целиком использующий участок реки от устья до г. Купянска. Это водохранилище не может влиять на последующие сооружения, располагаемые выше по реке. Но последние должны учитывать наличие существующей установки и соблюдать нормальную ее работу.

То же самое относится и к самым верхним объектам в бассейне реки, створы которых строго фиксированы топографическими и геологическими условиями, расположением населенных пунктов и т. п., а водные ресурсы ограничены и целиком будут освоены местными потребителями.

Местное решение водохозяйственных задач возможно также для пустынных и полупустынных районов.

Для малой реки вопрос о схеме ее использования отпадает, и здесь обычно речь идет о конкретном гидротехническом мероприятии для комплексного удовлетворения местных водопотребителей, что, однако, должно учитываться при решении региональной схемы или вариантов схемы использования основной реки.

Окончательный вариант схемы принимается на основе технико-экономического сопоставления нескольких возможных вариантов. Так, на рис. 1 показано, что из многочисленных вариантов створов, НПГ и водохранилищ, рассмотренных при выборе схемы использования реки, принято четыре гидроузла (сплошные линии створов и НПГ).

Одновременно намечается первоочередной объект строительства. Характеристики его при дальнейших топографических и геологических изысканиях и проектировании уточняются в плане и по высоте (из расчетов по нескольким вариантам подпора), что иногда вызывает корректировку для соседних ступеней каскада — высотную для нижней и высотно-плановую для верхней.

Поскольку к следующим ступеням схемы обычно приступают через несколько лет, то каждый раз она уточняется с учетом изменившихся условий, наличия и опыта действующей водохозяйственной установки. Этим термином обычно охватывается совокупность сооружений на реке, служащих для удовлетворения потребности в воде (или гидроэнергии) различных отраслей народного хозяйства. Простейший вид такой установки — водоприемное сооружение или водозабор для отвода воды из реки в условиях естественного ее режима. Если глубины в реке недостаточны для устройства и нормальной работы водозабора, сооружается также водоподъемная плотина, поддерживающая уровень воды на необходимой отметке. Плотина включает в себя водосбросные сооружения для сброса избытков воды в нижний бьеф, а иногда и специальные устройства для пропуска льда.

Водоподъемная плотина в ряде случаев применяется как самостоятельное средство для создания необходимых глубин на судо-

ходных реках. Если водный транспорт не является местным, то при плотине сооружается судоходный шлюз, обеспечивающий транзитное движение судов в течение периода навигации.

Необходимые для судоходства глубины часто поддерживаются комбинированными средствами — созданием подпора наряду с дноуглубительным землечерпанием и выправлением русла; повышением уровней за счет обильных попусков из водохранилищ, расположенных выше по реке, наряду с дноуглублением и выправлением русла.

Накопление запасов воды в водохранилище и аккумуляция избыточных вод требуются в очень многих случаях: для обеспечения необходимых расходов воды потребителям во время маловодья на реке, для борьбы с наводнениями и т. д.

Водохранилище создается достаточно высокой водоудерживающей (водохранилищной) плотиной, перегораживающей не только русло, но и всю долину реки. Как и в случае русловой водоподъемной плотины, здесь также предусматриваются водосбросные и водоприемные сооружения, однако тип и размеры их изменяются. Если водохранилище обеспечивает водопотребителей (или водопользователей), расположенных ниже по реке, то в плотине устраивается водоспуск для попусков воды в нижний бьеф, а водозаборы сооружаются в соответствующих створах ниже по реке. Разновидностью водохозяйственной установки является гидроэлектрическая станция (ГЭС), причем в состав гидроузла входит самостоятельным элементом сама электростанция (приплотинная ГЭС), а в установке деривационной ГЭС — также деривация и сооружения на ней: напорный бассейн, бассейн суточного регулирования, уравнительная башня и т. п.

Работа водохозяйственной установки гарантирует отдачу потребителю определенных количеств воды или гидравлической энергии. Речной сток перераспределяется водохранилищем соответственно требованиям потребителя; водозаборы или водоприемники, работая в конкретных гидравлических условиях, обеспечивают отбор воды для ее использования; излишки воды во избежание переполнения водохранилища удаляются через водосбросы в нижний бьеф.

Правилами эксплуатации сооружений, определяющими, в частности, порядок открытия различных отверстий, предусматриваются объем и ценность продукции установки, а также сохранность сооружений и оборудования.

Вопросы гидротехники изложены в книгах [13, 28], а сведения по экономическим расчетам в гидростроительстве приведены в работах [41, 72, 110, 117, 122].

Предмет водохозяйственных расчетов

Проектирование схемы использования водных ресурсов и конкретной водохозяйственной установки представляет собой совместное решение сложного комплекса вопросов, разделенных на три основных направления:

1) разработка водохозяйственной части проекта использования водных ресурсов;

2) проектирование сооружений, обеспечивающих наиболее эффективное использование водных ресурсов;

3) проектирование средств инженерной защиты против вредного воздействия водохранилищ и сооружений на существующий режим водотока, условия жизни и хозяйство прилегающих районов.

При рассмотрении схемы использования водных ресурсов бассейна или региона все три направления проектирования разрабатываются укрупненно с принципиальным решением и технико-экономическим обоснованием основных частей схемы (расположение гидроузлов, состав сооружений, капиталовложения и водохозяйственная эффективность намечаемых мероприятий).

Подробное исследование всех вопросов по указанным выше направлениям проектирования относится к первоочередной водохозяйственной установке.

Режим работы установки составляют следующие взаимно связанные элементы ее деятельности: режим расходов воды, отдаваемой потребителю, пропускаемой через ГЭС или сбрасываемой в нижний бьеф; режим уровней верхнего и нижнего бьефов, напоров, мощностей и т. п. При этом соответственно потреблению воды или энергии установка почти во всех случаях перераспределяет сток во времени, т. е. выполняет регулирование стока — суточное, сезонное, годичное или даже многолетнее (гл. IV).

Исследование этих элементов относится к предмету водохозяйственных (или водноэнергетических) расчетов. К задачам водохозяйственных расчетов относятся:

1) выявление водных ресурсов и их режима в конкретных створах или по участкам реки, намечаемой к использованию;

2) выяснение требований на воду и к режиму регулирования со стороны водопотребителей и водопользователей. Согласование противоречивых требований;

3) выявление водохозяйственного эффекта, который может быть получен от установки (количество воды и энергии, режим уровней или глубин в верхнем и нижнем бьефах и т. п.);

4) расчеты к выбору основных размеров сооружений, обеспечивающих получение наиболее выгодного водохозяйственного эффекта (высоты плотин, размеры водосбросов, мощности агрегатов ГЭС или насосных станций и т. д.);

5) разработка правил эксплуатации установки, обеспечивающих получение при выбранных ее параметрах наибольшего возможного эффекта;

6) расчеты регулирования стока по принятым правилам эксплуатации для освещения проектного режима установки за многолетие.

Кроме этих основных задач, к водохозяйственным и гидрологическим расчетам относится также характеристика сопутствующих явлений, вызываемых нарушением естественного режима реки при

сооружении гидроузла. Так, вместе с созданием водохранилища возникают потери воды на испарение и фильтрацию. В результате уменьшения скоростей течения в верхнем бьефе происходит отложение наносов и заиление водохранилища. Благодаря происшедшему в водоеме осветлению воды повышается ее транспортирующая способность, что вместе с большой скоростью течения в нижнем бьефе вызывает здесь резкий (непосредственно за плотиной) местный размыв, в отличие от размыва вдоль по реке, постепенно затухающего на значительном расстоянии от плотины. Вследствие этого с течением времени происходит понижение уровней воды — от наибольшего понижения у плотины до исчезающего в месте затухания размыва. Существенные изменения в связи с подпором возникают и в ледовом режиме в районе сооружения: на несколько суток раньше наступает ледостав в зоне подпора, на значительном участке нижнего бьефа появляется открытое русло в связи с поступлением из водоема воды с повышенной температурой. Особо следует отметить изменение качества воды в водохранилище с течением времени, причем некоторые стороны этой проблемы можно предвычислить.

§ 2. ДАННЫЕ О СТОКЕ КАК ОСНОВА ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Постановка задачи расчетов стока

Задача расчетов речного стока при намечаемом его использовании состоит в определении возможных его величин и режима их во времени. Эти сведения необходимы для обоснованного проектирования, обеспечения надежной работы сооружений и наиболее эффективной их эксплуатации. Например, размеры водохранилища, достаточные для заданной водоотдачи, можно правильно установить, если выяснен характер возможного в будущем маловодья — его длительность, степень понижения стока и т. п. Размеры водосбросных сооружений также определяются на основе расчета и построения гидрографов возможных в будущем высоких половодий и паводков.

Характеристики стока, определяемые расчетами, степень подробности последних устанавливаются соответственно задачам и методам водохозяйственных расчетов и в зависимости от назначения сооружений, их важности, условий строительства, эксплуатации и процесса работы установки.

Речной сток формируется под воздействием трех групп связанных между собой факторов [61]:

1) климата (осадки, температуры воздуха и почвы и т. п.);

2) ландшафта водосбора — его рельефа, почвенного и геологического строения, растительности;

3) морфометрических и гидравлических характеристик (размеры и форма водосбора, конфигурация речной сети, уклоны

и строение русла и т. п.), определяющих условия сочетания объемов воды, поступающей с различных частей водосбора.

На формирование стока большое влияние оказывает хозяйственная деятельность общества — особый фактор, не связанный с перечисленными и потому учитываемый самостоятельно.

Все эти факторы, воздействуя различным образом на выпавшие в пределах водосбора осадки, преобразуют их в речной сток и придают ему конкретный режим, свойственный только данному водотоку. Сравнение характеристик стока разных рек, привлечение гидрометрических данных других водотоков при решении конкретных элементов режима изучаемой реки возможно и вполне целесообразно лишь при аналогичных факторах стока сравниваемых рек данного типа. Аналогия выявляется из подобия в ходе стока рек за синхронные отрезки времени.

Типизация рек по режиму стока основана на укрупненных физико-географических обобщениях факторов стока. Согласно классификации Б. Д. Зайкова [34], в нашей стране имеется 10 типов рек.

Отметим, что первичными и решающими факторами стока являются климатические. Прежде всего ими обусловлен ход стока за многолетие и в пределах года. Поэтому в ряде случаев, при прочих равных условиях, для общей оценки возможных отклонений в явлениях стока используется сопоставление климатических факторов, соответствующих наблюденным явлениям стока, с аналогичными факторами за другие годы, для которых сток отсутствует. Многообразие весьма сложных условий, формирующих климат и сток, позволяет рассматривать проявления того или другого как случайные, причем прогнозирование стока на достаточно длительное время не удается.

При отмеченных условиях для всех случаев гидрологических и водохозяйственных расчетов крайне необходимы гидрометрические данные по опорным пунктам на реке (и в соседних бассейнах) за длительный ряд лет. Эти данные используются для расчетов в двух видах:

1) как непосредственная первооснова расчетов по гидрометрическому ряду;

2) для получения статистических характеристик стока, необходимых при вероятностных расчетах (гл. V).

Обобщенное описание стока

Как уже отмечено, к явлениям стока применяется вероятностная форма расчета — предвидения, опирающаяся на статистические расчеты и состоящая в том, что устанавливается лишь повторяемость типичных величин стока, без указания календарных сроков их наступления. Вероятностная форма расчета стока дополняется расчетом хода стока по временам года — сезонного распределения стока в годовом цикле.

Наряду с этими двумя формами предвидения стока используются гидроинформации и срочные прогнозы, опирающиеся на связи стока с гидрометеорологическими характеристиками предшествующего периода. Однако заблаговременность таких прогнозов даже для крупных рек обычно не превышает нескольких месяцев, а точность их резко понижается с увеличением заблаговременности.

По мере усовершенствования методики, допускающей значительное повышение заблаговременности и точности прогнозов стока, вероятностная форма его предвидения все в большей мере будет дополняться соображениями о его календарной последовательности.

Вероятностные расчеты применяются к достаточно однородным по происхождению (по своему существу) величинам стока, многолетние колебания которых могут рассматриваться как случайные и независимые. Такими расчетными величинами стока являются минимальный месячный и суточный сток летний и зимний, максимальные расходы и объемы стока от снеготаяния и от ливней, объемы стока за год, межень, сезон и другие фазово-однородные величины стока, относящиеся в различные годы к сходным фазам (а не календарным датам) годового стокового цикла.

В практике гидрологических расчетов установлено, что фазово-однородные величины стока подчиняются определенным законам распределения вероятностей. Важным средством таких расчетов стала кривая обеспеченности — интегральное изображение распределения вероятностей. По этой кривой однозначно определяется средняя вероятность появления того или иного значения стока, причем вероятность выражается в процентах от числа случаев. Например, обеспеченность $P=95\%$ означает, что низкий сток может появиться в среднем 1 раз в 20 лет; $P=0{,}1\%$ соответствует средней возможности появления одного максимума из 1000 случаев (лет) и т. п.

Для построения кривых обеспеченности необходимо знать лишь основные статистические параметры стока и их средние квадратические ошибки (σ):

среднее значение стока (норма):

$$\overline{X}=\sum X_i : n, \tag{1}$$

$$\sigma_{\overline{X}}=C_v\overline{X} : \sqrt{n}; \tag{2}$$

коэффициент вариации:

$$C_v=\sqrt{\frac{\sum (K-1)^2}{n-1}}, \tag{3}$$

$$\sigma_{C_v}=\frac{C_v\sqrt{1+C_v^2}}{\sqrt{2n}}; \tag{4}$$

среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \overline{X} C_v, \tag{5}$$

$$\sigma_x = \frac{\sigma \sqrt{1 + 3C_v^2}}{\sqrt{2(n-1)}}; \tag{6}$$

коэффициент асимметрии:

$$C_s = \frac{\sum (K-1)^3}{nC_v^3}, \tag{7}$$

$$\sigma_{C_s} = \sqrt{\frac{6}{n}} \sqrt{1 + 6C_v^2 + 5C_v^4}. \tag{8}$$

Суждение о надежности параметров выводится из сопоставления их величин и свойственных им ошибок.

Если для определения статистических параметров стока используется наблюденный ряд стока, то они устанавливаются по методам моментов, наибольшего правдоподобия (аналитическому) и графоаналитическому методу Г. А. Алексеева [16, 121].

В гидрологических расчетах широкое применение нашли кривые обеспеченности биномиального типа (кривые Пирсона III типа при $C_s = 2C_v$), а в последнее время — семейство кривых С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [59] для разных соотношений между C_s и C_v. Все кривые этого семейства для нулевой ординаты дают обеспеченность $P = 100\%$, а при $C_s = 2C_v$ наблюдается полное совпадение с биномиальной кривой. Координаты этих кривых приводятся в курсах гидрологии.

Кривые обеспеченности при $C_s = 2C_v$ показаны на рис. 2. Кроме кривых, на графике наносятся эмпирические (наблюденные) величины с обеспеченностью P, определенной по одной из формул:

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100\%, \tag{9}$$

$$P = \frac{m - 0{,}3}{n + 0{,}4} \cdot 100\%, \tag{10}$$

где m — порядковый номер члена ряда, расположенного в убывающем порядке; n — общее число членов ряда.

Формула (9) рекомендуется для максимальных расходов, а формула (10) — для среднегодовых и прочих характеристик [121].

Кроме обеспеченности по зависимостям (9) и (10), наблюденным величинам присваивается также обеспеченность по кривой соответственно высоте ординаты каждой точки.

При использовании кривых обеспеченности колебания стока описываются посредством небольшого числа параметров; упрощается методика гидролого-географических обобщений путем построения изолиний норм стока, коэффициентов вариации и т. п.;

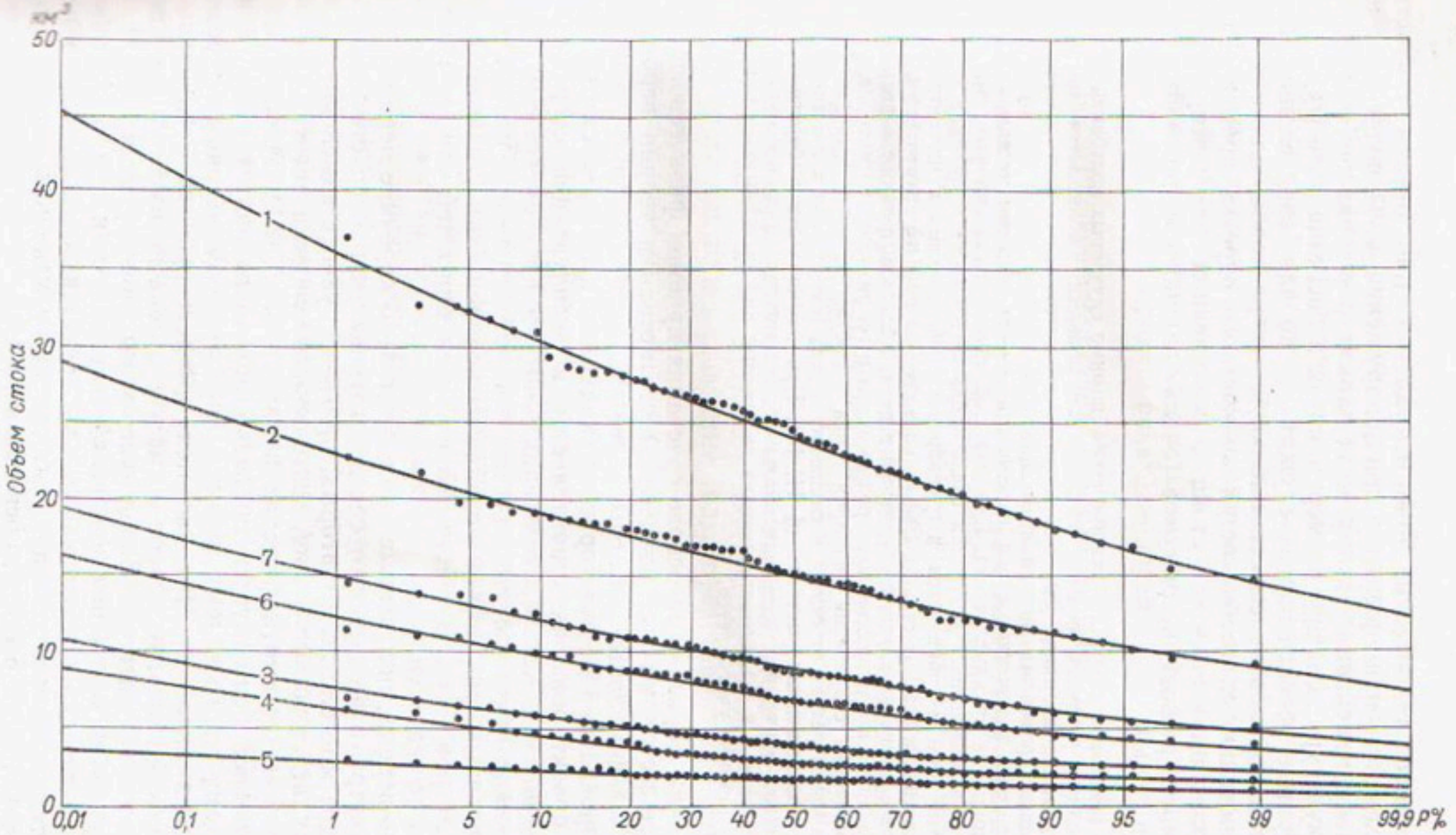


Рис. 2. Кривые обеспеченности годовых и сезонных объемов стока.

1 — год (IV—III), *2* — весна (IV—VI), *3* — лето (VII—IX), *4* — осень (X—XII), *5* — зима (I—III), *6* — лето—осень (VII—XII), *7* — межень (VII—III).

появляются технические приемы, удобные для оценки точности водохозяйственных расчетов при обнаружении или допущении конкретного изменения тех или иных параметров стока под влиянием агрикультурных и других мероприятий в бассейне реки [78].

Кривые обеспеченности служат также для определения действительной повторяемости наблюденных расходов, для исключения нетипичных особенностей конкретного отрезка времени, для экстраполяции значений стока с выявлением их повторяемости в области редких экстремумов (очень больших и очень малых расходов воды).

В некоторых случаях в режиме стока, помимо случайных колебаний фазово-однородных расходов воды и сезонной цикличности, наблюдается тенденция к сохранению аномалий [59]. Обилие или недостаток воды продолжается и за пределами сроков их первичного возникновения. Это вполне обнаруживается в ходе стока за смежные сутки, недели, слабее — за смежные месяцы, иногда — за сезоны (на крупных реках). При большой изменчивости годового стока (например, в Казахстане) частичная связь наблюдается даже в объемах стока за смежные годы и проявляется в группировках многоводных и маловодных лет. Эти явления в режиме стока вызываются влиянием на него грунтового и руслового регулирования влаги, поступившей в речной бассейн, а также известной нестационарной цикличностью метеорологических и геофизических факторов.

Тенденция сохранения аномалии стока в соответствующих случаях учитывается при переходе от сезона к смежному сезону или от года к смежному году в водохозяйственных расчетах (§ 11, 13). При расчетах же выборочных несопряженных значений стока (максимальных или минимальных расходов, сезонных объемов и т. п.), представляющих дискретный ряд случайных величин, связь между ними не учитывается.

Таким образом, на основе сочетания приемов физического анализа с методами математической статистики и теории вероятностей максимальные расходы, минимумы стока и другие важные его проявления из категории неожиданных и не предусмотренных при проектировании, строительстве и эксплуатации сооружений переводятся в категорию предвиденных и предусмотренных. Однако надо отметить, что изложенный метод решения не является безупречным, так как он исходит из неизменности статистических параметров стока. В действительности же они в той или иной мере могут изменяться.

Во-первых, полученные за сравнительно короткие периоды, эти параметры отличаются от соответствующих характеристик за длительное многолетие. Во-вторых, прогрессирующее изменение стока в результате хозяйственной деятельности человека влечет за собой изменение его статистических параметров. Для уточнения этих параметров используется приводка исходного ряда стока к длительному многолетнему периоду, выполняемая методом гидрологических аналогий. Что касается прогрессирующих неслучайных изменений стока, то вопрос об их учете пока не имеет достаточно надежного решения. Вследствие этого при проектировании и во время эксплуатации водохозяйственной установки необходимо производить приближенную оценку возможных отклонений в показателях ее работы при ожидаемых изменениях параметров стока. Более подробно это освещается в § 16.

Как отмечают С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61], при изучении столь сложных явлений природы, как речной сток, нет и не может быть трафаретов, универсальных расчетных приемов и формул, безоговорочно применимых к каждому случаю.

При решении каждой отдельной задачи, опираясь на общие положения теории формирования стока и на обобщенный опыт, накопленный гидрологией, необходимо тщательно изучать особенности данного конкретного водосбора и использовать все относящиеся к нему характеристики факторов стока и гидрометрические наблюдения по данной реке и рекам-аналогам.

Расширение гидрологической информации

Даже при наличии по рассматриваемой реке многолетних гидрометрических рядов следует использовать всю совокупность гидрологических и метеорологических данных по району для расширения представлений о стоке. Так, например, сопоставление величин $Q_{макс}$ по данной реке со сведениями об исключительных наводнениях на реках окружающего района поможет точнее оценить повторяемость $Q_{макс}$. По многолетним данным об осадках можно судить, является ли период гидрометрических наблюдений аномальным по осадкам за год, за зиму и т. п., и можно дать примерную количественную оценку аномальности этого периода по стоку. Подобному же анализу могут быть подвергнуты имеющиеся в ряду многоводные и маловодные годы, представляющие интерес или вызывающие сомнение.

Несоответствие отдельного члена ряда фактической длительности последнего выявляется при сравнении вероятностей отклоняющейся величины по статистическим параметрам (например, $^1/_{200}$, т. е. 1 раз в 200 лет) и в наличном ряду ($^1/_{20}$ или $^1/_{30}$, т. е. 1 раз в 20—30 лет). Резкое отклонение случайного значения от остальных членов ряда следует принять во внимание при расчете параметров ряда — среднего, коэффициента изменчивости и т. п. В некоторых случаях такой член ряда можно исключить из обработки или при определении параметров учесть более редкую его повторяемость [59, 93].

Часто ряд наблюдений по стоку охватывает 10—15 лет, которых недостаточно для обоснования проекта.

При ограниченности гидрометрических данных или отсутствии их расчеты стока выполняются по косвенным приемам, использующим зависимость характеристик стока от элементов климата и ландшафта.

Иногда за неимением фактических данных о стоке реки прибегают к составлению искусственного стокового ряда (способ Г. П. Иванова). Восстанавливаемый ряд считается совпадающим с фактическим рядом реки-аналога по значениям обеспеченности величин стока каждого года. Для перенесенного с реки-аналога хронологического ряда значений обеспеченности устанавливаются соответствующие им величины стока при помощи кривой

обеспеченности для изучаемого створа, причем коэффициенты вариации и асимметрии для ее построения, а также норма стока находятся по формулам, графикам, изолиниям и т. п.

Полученные величины стока не являются синхронными с исходным рядом, не дают последовательности стока определенного календарного отрезка времени. Они условно отражают возможный на реке режим лишь в смысле характера вероятных колебаний стока. При этом требуется оценить, насколько вычисленные по такому ряду статистические характеристики стока отклоняются от таковых за многолетие, и исправить их. Необходимо также удлинить имеющийся ряд, чтобы повысить его надежность для водохозяйственных расчетов и выявления особенностей режима работы установки.

Для решения этих задач следует использовать данные о стоке рек-аналогов, переносимые к рассматриваемому створу известными в гидрологии приемами (путем построения графических связей, корреляционных зависимостей [159, 93, 121] и т. п.), а также материалы метеорологических наблюдений.

Согласно работам [61, 121], уточнение статистических параметров стока путем приводки их к многолетнему периоду, а также достоверное удлинение рядов стока практически возможно, если длительность наблюдений не менее 10—15 лет, а коэффициент корреляции между синхронными рядами стока данной реки и аналога при наличии графической связи рядов составляет не меньше 0,80. Такой прием применяется к годовым величинам стока, необходимым для глубокого многолетнего регулирования. Внутригодовое распределение стока учитывается при этом по расчетным схемам [121]. Возможно использование того же приема отдельно по фазам годового цикла при построении соответствующих кривых обеспеченности.

Особым приемом «удлинения» рядов является моделирование их, что используется при регулировании стока по методу Монте-Карло и рассматривается вместе с ним (см. § 11).

Выбор расчетного периода и расчетных лет

Расчетный календарный период выбирается таким, чтобы он мог характеризовать все особенности стока данной реки и чтобы он не был чрезмерным для выполнения проектных работ. Длительные гидрометрические ряды часто приходится ограничивать, а сравнительно короткие — удлинять по связи с аналогичными данными смежных водпостов или ближайших рек. Выбор периода сопровождается детальным анализом повторяемостей входящих в него величин стока за год или за отдельные фазы годового цикла. Особого внимания требует оценка экстремальных (высоких и низких) величин стока.

При проектировании каскада водохозяйственных установок на реке требуется выбрать общий период, по стоку которого выполняются водохозяйственные расчеты всех связанных между

собой установок каскада. При этом каждое сооружение, расположенное ниже по реке, использует сток, перераспределенный верхними водохранилищами, и сток воды, поступающей в реку ниже верхних плотин (собственная приточность водохранилища). В таких условиях требуется установить приточность для каждого бьефа рассматриваемого каскада, для чего необходима тщательная увязка стока на всем используемом участке реки.

Расчетный период, выбираемый на основе анализа всего гидрометрического ряда, должен удовлетворять следующим требованиям:

а) по общей водности он должен быть близким к норме;

б) коэффициенты вариации годового стока этого периода и всего гидрометрического ряда должны быть равны или близки;

в) в состав периода должны входить маловодные годы и периоды, многоводные и средние годы или комбинации лет, представляющие интерес для конкретных водохозяйственных условий;

г) в пределах этого периода должна по возможности происходить сработка и наполнение водохранилища при многолетнем регулировании стока.

Длительность расчетного периода при неглубоком (сезонном) регулировании обычно принимается равной 15—20 годам, при глубоком (многолетнем) — более 20 лет. В конкретных же случаях ее выбирают в зависимости от степени изменчивости годового стока (C_{vr}), характера его циклических колебаний и требуемой точности определения нормы и C_{vr} [121].

Для выбора расчетного периода используется также теоретическая кривая обеспеченности годовых величин стока, построенная по параметрам всего ряда. Кроме кривой, на рисунок наносятся точки — наблюденный сток за все годы. Среди них точки расчетного периода, имеющие для отличия особое обозначение, должны располагаться близко к теоретической кривой и сравнительно равномерно по ее длине. Этим подтверждается отсутствие резкого расхождения между коэффициентами асимметрии короткого и длинного периодов.

Если средний сток принятого расчетного периода несколько отличается от многолетней нормы, расхождение устраняется умножением расходов периода на соотношение нормы и упомянутого среднего стока или путем введения корректива в результаты водохозяйственных расчетов.

При наличии для рассматриваемого створа данных о стоке за ограниченный период репрезентативность его (по норме, C_v и т. п.) проверяется по стоку реки-аналога за многолетие, хронологически включающее упомянутый период. При нетипичности этого ограниченного стокового ряда из него исключается часть лет в начале или в конце периода или добавляются годы, сток которых определяется по связи с аналогом. Изменение длительности располагаемого ряда производится так, чтобы расчетный ряд удовлетворял указанным выше условиям. В частности, по первому условию расчетный период очень удобно выбирать по интегральной кривой стока (см. § 10).

При сезонном регулировании стока наряду с расчетным периодом выбираются также расчетные годы. При этом на первых стадиях проектирования или при исследовании вариантов водохозяйственной схемы расчеты выполняются по отдельным характерным годам, а на завершающих стадиях или для окончательно принятого варианта — по достаточно длительному стоковому ряду.

В качестве характерных принимаются водохозяйственные годы (от жесткого для всех лет календарного начала половодья до конца межени): а) маловодный с заданной обеспеченностью стока $P\%$; б) средний (норма) или близкий к нему; в) многоводный с обеспеченностью 5, 10 и 20%, в зависимости от технических и хозяйственных условий. Эти годы или близкие к ним выбираются из имеющегося гидрометрического ряда так, чтобы обеспеченность стока за год, межень и лимитирующий сезон была равна или близка к заданной. Выбор производится при помощи статистических параметров или, проще, при помощи формулы (10), т. е. непосредственно по расположенным в общей таблице в убывающем порядке величинам стока за год, межень, лимитирующий сезон и т. п., с надписью у каждой величины ее года. Номер строки дает ее эмпирическую обеспеченность [6, 121].

В расчетном маловодном году водность сезона, в пределах которого водохранилище срабатывается (обычно это — вся межень в целом), имеет особое значение, так как от нее зависят размеры полезной емкости. Если в фактическом ряду не удается выбрать год с общим стоком и стоком межени, соответствующими порознь заданной обеспеченности, то делается приводка фактического меженного стока ближайшего года к расчетной межени (путем умножения расходов данного года на отношение меженного стока расчетного и фактического). Годовой сток при этом может оказаться несколько отклоняющимся от стока заданной обеспеченности, чем обычно пренебрегают.

Выбор характерных по водности лет: маловодного ($P \approx 97\%$), среднего и многоводного ($P \approx 1\%$) рассмотрим на примере [61].

Представляющие интерес для эксплуатации установки сезоны и фазы стока, его параметры, подсчитанные с использованием всего ряда величин стока за 59 лет, показаны в табл. 7. По данным этой таблицы построены кривые обеспеченности (см. рис. 2),

Таблица 7

Параметры стока по сезонам и за год

Параметры	Весна	Лето	Осень	Зима	Лето — осень	Межень	Год
	IV–VI	VII–IX	X–XII	I–III	VII–XII	VII–III	IV–III
Средний объем стока, км³	15,1	4,1	3,1	1,8	7,2	9,0	24,1
Коэффициент вариации	0,20	0,30	0,30	0,20	0,26	0,25	0,19
Коэффициент асимметрии	0,40	0,60	0,60	0,40	0,52	0,50	0,38

на которые наносятся значения стока и соответствующие номера лет (последние на рисунке опущены). По этим кривым отбираем годы, которые в целом и отдельно по сезонам близки к заданным обеспеченностям (табл. 8).

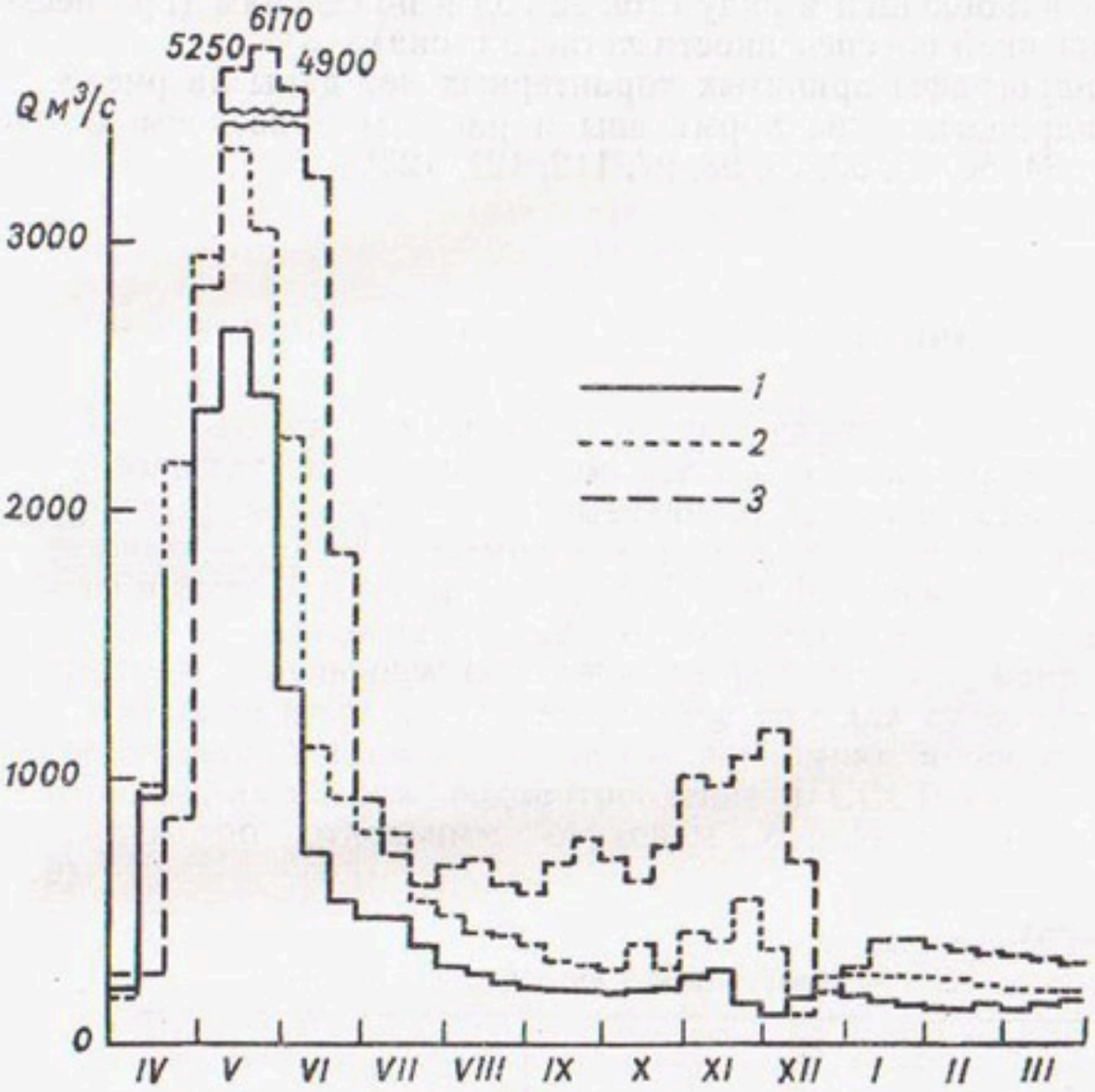


Рис. 3. Характерные гидрографы.

1 — маловодный 1938-39 г., *2* — средний 1922-23 г., *3* — многоводный 1926-27 г.

Таблица 8

Обеспеченность стока по годам и сезонам, %

Годы	Весна	Лето	Осень	Зима	Лето — осень	Межень	Год
Маловодные							
1921-22	98,7	96,0	85,0	90,0	96,2	95,3	99,2
1937-38	98,4	80,0	91,8	94,4	91,5	92,0	98,4
1938-39	90,0	93,2	95,0	97,2	97,5	97,3	96,8
1939-40	85,5	92,5	85,5	93,5	95,5	95,0	93,5
Средние							
1919-20	42,5	61,0	54,0	55,0	63,0	60,0	52,5
1922-23	51,0	52,0	55,0	42,0	56,5	53,0	54,5
Многоводный							
1926-27	1,25	13,8	0,9	2,0	1,7	1,8	0,7

Из отобранных четырех маловодных лет ближе к заданной обеспеченности 97% находится 1938-39 г. Оба средних года по своим показателям примерно равноценны, но 1922-23 г. имеет более сглаженный ход стока по сезонам. Многоводный 1926-27 г. имеет наибольший в ряду сток за год и по сезонам (при несколько повышенной обеспеченности летнего стока).

Гидрографы принятых характерных лет даны на рис. 3.

Гидрологические нормативы и расчеты приведены в работах [6, 21, 34, 50, 55, 59, 65, 93, 97, 112, 121, 123].

Глава II

ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ, ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ИХ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ

§ 3. ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ И ВОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Вода используется для ряда отраслей народного хозяйства, причем в большинстве случаев комплексно. Использование водных ресурсов происходит: 1) с изменением их количества, качества и режима — так называемое водопотребление (при использовании воды в быту, сельском хозяйстве, промышленности) и 2) без количественного изменения — так называемое водопользование (хотя нередко с нарушением естественного режима, как, например, при использовании воды в гидроэнергетике или для судоходства).

Соответственно плановому развитию экономики и повышению благосостояния населения водопотребление в СССР непрерывно увеличивается по отдельным отраслям народного хозяйства (табл. 9).

Таблица 9

Динамика потребления воды, км³/год

Потребители	На 1962 г.		На 1970 г.		В перспективе на 1985 г.	
	полное	в том числе безвозвратное	полное	в том числе безвозвратное	полное	в том числе безвозвратное
Сельское хозяйство	120,5	98,6	153	118	245	193
Промышленность	30,6	8,4	89,6	5,7	124	13,1
Города и рабочие поселки . . .	5,0	2,0	10,2	3,1	30,6	6,6
Рыбное хозяйство	14,6	3,0	16,8	6,3	37,0	12,0
Прочие	26,9	10,6	22,4	22,4	35,3	35,3
Всего . . .	197,6	122,6	292	155,5	472	260

Примечание. Таблица составлена по данным «Энциклопедического справочника», материалам Минводхоза СССР и др. Эти сведения имеют оценочный характер.

В связи с ростом водопотребления требования на воду всегда рассматриваются для нескольких уровней развития народного

хозяйства, которые обычно привязываются к общегосударственным планам (пятилеткам и более отдаленным срокам). В увязке с указанными требованиями намечаются сроки строительства и ввода в эксплуатацию водохозяйственной установки и развития ее мощности. Почти каждая крупная установка вступает в действие очередями — по частям ее мощности, что диктуется возможностями ее последовательного освоения, условиями строительных работ и другими хозяйственными и техническими соображениями.

Согласно правилам проектирования, рассматривается уровень потребления, а значит и режим работы водохозяйственной установки в первые годы ее нормальной эксплуатации, т. е. примерно в течение 3—5-летнего срока, и в последующие годы, через 10—15 лет от начала ее работы.

Дополнительно освещается потребление: а) на отдаленную перспективу, если проектом охватывается развитие народного хозяйства на большой срок вперед, в связи с чем условия работы установки (например, ГЭС) могут значительно измениться; б) при особых обстоятельствах, к которым могут относиться: длительный срок от начала наполнения водохранилища до перехода на нормальную эксплуатацию; уменьшение емкости водохранилища в результате непрерывного заиления (на реках с большим количеством наносов); изменение водохозяйственных условий под влиянием деятельности человека в бассейне реки выше данной установки и т. п. В связи с этим, например, контроль всего водного хозяйства тепловой электростанции требуется через каждые 5—10 лет.

Величины водо- или энергопотребления, полностью удовлетворяющие потребителя, называют нормой потребления (на душу населения в сутки, на единицу продукции и т. п.). Количество воды или энергии, составляющее норму, потребляется неравномерно, отражая циклические колебания: а) сезонные, обусловленные влиянием смены времен года на хозяйственную деятельность (сезонность водного транспорта, ирригации и т. п.); б) суточные, вызываемые сменой дня и ночи: потребление воды и энергии на производстве и в быту изменяется по часам суток; в) недельные, обусловленные сменой рабочих дней и дней отдыха.

В потреблении проявляются частично колебания, имеющие нерегулярный характер (например, увеличение расхода энергии на освещение в пасмурные дни и т. п.).

Колебания по временам года и часам суток выражаются системой суточных графиков водопотребления или электронагрузки, каждый из которых относится к определенному месяцу или сезону года. По электронагрузке основными характеристиками являются средние и пиковые мощности в типичные сутки каждого месяца (см. гл. X).

Колебания потребления оцениваются коэффициентами неравномерности. При этом различают: коэффициент часовой неравномерности — отношение максимального за час водопотребления

(или нагрузки) к среднему потреблению за все часы в сутки наибольшего водопотребления; коэффициент суточной неравномерности — отношение наибольшего потребления в целом за сутки к среднему за все сутки года. Аналогичные коэффициенты встречаются для месяца и т. п.

Поскольку хозяйственная деятельность поддается регулированию, возможно некоторое планомерное сглаживание годовых и суточных графиков нагрузки, укомплектование графиков водопотребления за весь сезон ирригации и т. п.

Рассмотрим водопотребление отдельных отраслей народного хозяйства.

Коммунальное и промышленное водоснабжение

При проектировании водоснабжения населенных мест, промышленных предприятий и сельского хозяйства учитываются расходы воды:

а) на хозяйственно-питьевые нужды в жилых домах и коммунальных предприятиях (банях, прачечных, больницах и пр.), бытовые и питьевые нужды людей во время пребывания их на производстве, поливку улиц и зеленых насаждений, содержание животных на фермах и пастбищах и пр.;

б) на производственное потребление на предприятиях промышленности, транспорта, энергетики и сельского хозяйства (производство пара, охлаждение оборудования, изготовление продукции, промывка сырья и т. п.);

в) на возможные запросы пожаротушения.

Количество воды определяется по нормам водопотребления и зависит от численности населения, характера производства и его производительности, численности животных в сельском хозяйстве и т. д.

Нормы потребления хозяйственно-питьевой воды населением [114, 116] зависят от благоустройства населенных мест, климатических условий и т. д. (табл. 10).

На бытовые нужды людей, пребывающих на производстве, норма потребления воды для цехов со значительным тепловыделением принимается равной 45 л, в остальных цехах — 25 л на 1 человека в смену. Кроме того, на производствах, требующих особого санитарного режима, расход воды принимается равным 500 л/ч на одну душевую сетку. Число сеток определяется по расчету [116].

Нормы водопотребления санаториев, домов отдыха, дошкольных учреждений, школ, клубов, театров, коммунальных предприятий, спортивных сооружений, а также расходы воды на пожаротушение и для сельскохозяйственного водоснабжения приводятся в работе [116]. Для всех этих водопотребителей подается вода питьевых качеств. Она должна быть прозрачной, не иметь запаха и привкуса, вредных солей и бактерий, обладать умеренной жесткостью — удовлетворять высоким требованиям по

составу и количеству находящихся в воде микроорганизмов и веществ неорганического и органического происхождения.

Нормы, качество и режим расхода воды на фермах и пастбищах, а также для процессов машинного производства в сельском хозяйстве и для переработки его продукции приводятся в специальных руководствах.

Таблица 10

Нормы хозяйственно-питьевого водопотребления населения городов и поселков, л/сутки на 1 чел.

Характеристика зданий	Норма [1]		Коэффициент часовой неравномерности [1]
	средняя суточная за год	максимальная суточная в году	
Без водопровода и канализации (водопользование из водоразборных колонок)	30—50	40—60	2,0—1,8
С водопроводом и канализацией	125—150	140—170	1,5—1,4
С водопроводом и канализацией, ваннами и центральным горячим водоснабжением . . .	275—400	300—420	1,25—1,2

[1] Нижние пределы относятся к северным районам СССР, верхние — к южным.

Как видно из данных табл. 10, вода из источника водоснабжения для хозяйственно-питьевых нужд забирается в течение года достаточно равномерно. Более существенны бывают колебания почасовые, которые удовлетворяются за счет соответствующих резервуаров. На рис. 4 показан график суточного водопотребления города, причем коэффициент часовой неравномерности равен 1,5. Для больших городов этот коэффициент снижается до 1,25—1,20, что обусловлено более существенной ролью промышленного водопотребления, которое во многих случаях подсоединяется к городскому водопроводу. Внутрисуточная неравномерность потребления обычно удовлетворяется за счет резервуаров городского водопровода, а из источника вода забирается в течение суток достаточно равномерно.

Большое количество воды (60—70% и более), доставляемой в города, возвращается обратно в реки через канализацию.

Промышленное водопотребление определяется нормами расхода воды на единицу продукции (или сырья) и производительностью предприятия. Нормы водопотребления разнообразны, как и виды производств. Даже на аналогичных предприятиях нормы бывают неодинаковы, что зависит от схемы технологического процесса, типа оборудования, местных условий и других причин.

Промышленное водопотребление в ряде случаев требует больших количеств воды. Однако обычно лишь небольшая часть ее используется безвозвратно как сырье, уходит на потери в технологическом цикле, исключается из баланса как особо загрязненная, требующая дорогой очистки, вредная и т. д. Большая же часть воды уходит с предприятия, лишь изменив свои качества, которые во многих случаях целесообразно восстановить до исходных или приемлемых для водопользования, применяя очистку, охлаждение и т. д. Эти мероприятия необходимы также для поддержания водотоков в естественном состоянии.

Если расходы воды в реке в маловодные периоды достаточны и используются для снабжения предприятия только свежей водой, то такая схема промышленного водоснабжения называется прямо-

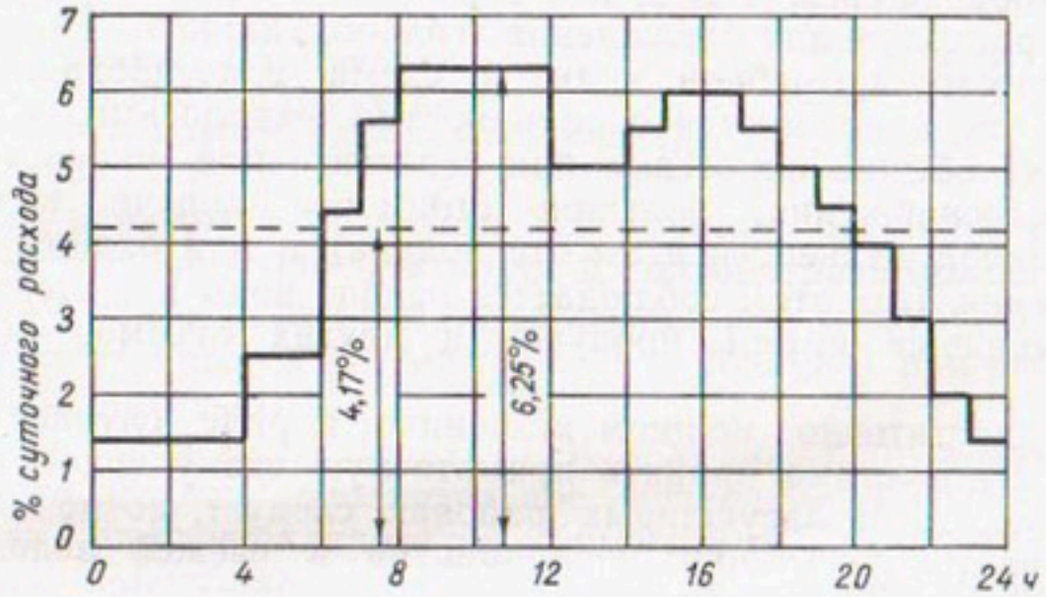


Рис. 4. Изменение расхода воды, подаваемой городским водопроводом по часам суток.

точной. В случаях же, когда отработанные воды после очистки или охлаждения непрерывно используются в технологическом цикле, а из источника восполняется лишь безвозвратный расход, схема водоснабжения называется оборотной, или циркуляционной. Существуют также смешанные или комбинированные схемы (прямоточно-оборотная и прямоточная наряду с оборотной).

При оборотной схеме водоснабжения для охлаждения оборудования предприятий жесткость воды под влиянием усиленного испарения от подогрева непрерывно увеличивается. При этом во многих случаях требуется опреснение воды в охлаждающих устройствах (в бассейнах брызгальных установок, градирен или прудах-охладителях). Опреснение обычно создается сливом жесткой воды из бассейна и заменой ее пресной из другого источника. Такой процесс опреснения воды в водоемах, называемый иногда «продувкой», требует определенного количества заменяющей воды, что должно учитываться в водном балансе (см. § 41).

Восполнение безвозвратного расхода воды в оборотной системе, т. е. добавка в нее свежей воды, является собственно водопотре-

блением данной установки. Оно самостоятельно выступает в случаях, когда регенерация оборотной воды (опреснение, охлаждение и т. п.) отделена от источника. Если же регенерация производится в пруде — подпорном бьефе реки, служащем источником водоснабжения, — то из него забирается вся потребная предприятию вода, оборотная и свежая. При этом водоприемник, насосная станция и водовод рассчитываются на суммарный расход воды. Размеры же источника, его дебит определяются только потребностями в свежей воде, так как оборотная непрерывно сбрасывается в пруд и поступает к водоприемнику. Соотношение между расходами свежей и оборотной воды зависит от качества свежей воды, технологического процесса предприятия и дебита источника. Чем меньше минерализация воды в нем, тем меньше требуется добавки свежей воды для опреснения. От температуры воды зависит расход ее для охлаждения теплообменников.

Количество потребной воды и схема водоснабжения предприятия устанавливаются специалистами-технологами. К оборотной схеме обычно прибегают при недостаточной мощности источника водоснабжения, большой стоимости подачи воды (при значительной дальности и высоте подачи) и для охраны реки от загрязнения. При этом соблюдается подача воды в систему только на восполнение потерь, продувки и других отъемов оборотной воды.

При достаточно мощном источнике в ряде случаев бывает удобно и допустимо принять прямоточную схему водоснабжения. В маловодных и засушливых районах следует, по возможности, ограничивать потребность предприятий в свежей воде, максимально используя оборотный цикл. Потребность в свежей воде даже крупных предприятий относительно невелика и составляет обычно сотни литров в секунду. Однако в ряде производств горнорудной, чугунолитейной, химической, нефтеперерабатывающей, бумажной и других видов промышленности расход воды довольно значителен. Представление об этом дает работа [125], в которой показано, что забор воды и сброс сточных вод по сезонам года изменяются незначительно.

Качество воды, согласно изложенному, имеет важное значение для промышленного водоснабжения. Основными показателями при этом будут общая минерализация, жесткость и температура воды.

Специфическими потребителями воды являются тепловые электростанции — ГРЭС.

Большое количество воды подается для охлаждения теплообменников современных мощных электростанций, в том числе и атомных.

Расходы воды, подаваемой для охлаждения, которая может быть почти целиком использована как оборотная, зависят от мощности ГРЭС, типа энергомеханического оборудования и времени года. В среднем на ГРЭС мощностью 1 млн. кВт даже зимой подается расход воды 30—40 м^3/с (в зависимости от мощности агре-

гатов), а летом — в полтора раза больше. Такой поток составляет целую реку, подобную Оке или Дону в межень.

Основная масса воды идет на охлаждение конденсаторов. Выходя из турбин в конденсаторы, пар конденсируется под влиянием проходящей по трубкам охлаждающей воды, причем в паровом пространстве конденсатора создается давление 0,03—0,09 ата, т. е. глубокий вакуум. Это дает большой энергетический выигрыш частично за счет использования дополнительного давления (0,97—0,91 ата), а главным образом за счет резкого изменения теплового состояния пара при вакууме. Так, например, при давлении пара перед турбиной 90 ата, его температуре 500° С и теплосодержании 810 ккал/кг используемый в турбине перепад тепла характеризуется следующими величинами.

Конечное давление, ата	1,0	0,04
Теплосодержание, ккал/кг	630	543
Используемый перепад тепла, ккал/кг . . .	180	267

Таким образом, используемый в турбине перепад тепла при конечном давлении 0,04 ата почти в полтора раза выше, чем при давлении 1 ата, т. е. при работе на выхлоп в атмосферу. В такой же пропорции изменяется расход пара (или топлива) при работе одинаковой мощностью.

Свежая вода расходуется ГРЭС: а) на пополнение потерь оборотного цикла: дополнительное испарение с охлаждающих устройств (прудов-охладителей, брызгальных установок, градирен), унос брызг, продувку, утечки; б) на питание котлов и промывку фильтров водоочистки; в) на потери в системе гидрозолоудаления; г) на хозяйственно-бытовые потребности ГРЭС и поселка при ней.

Общая потребность ГРЭС в воде, а также сброс сточных вод из расчета на одну машину указаны в работе [125]. Расчет составляющих водопотребления приведен в § 26. Здесь отметим, что для маломощных агрегатов (25 тыс. кВт) количество свежей воды не превышает 6% оборотной. Более мощные машины снижают эту величину до 1,5%. Существуют, однако, очень мощные ГРЭС, расположенные у крупных рек и имеющие прямоточное водоснабжение, включая и охлаждение теплообменников. При этом ГРЭС не загрязняют реки, но спускают огромное количество воды, подогретой по сравнению с речной водой на 8—10° С. Это ухудшает санитарное состояние рек и водоемов, отрицательно влияет на рыбоводство и способствует развитию фитопланктона, зарастанию и цветению, что в свою очередь приводит к ухудшению прозрачности воды, появлению в ней привкуса и запаха.

Технические вопросы водоснабжения изложены в трудах [1, 114], а условия санитарной охраны — в работе [134] и др.

Орошение земель

Орошение земель является весьма крупным водопотребителем с довольно неравномерным режимом потребления воды. Вода необходима для того, чтобы растворять в почве питательные вещества и перемещать их по всему растению. При этом все его ткани поддерживаются в состоянии насыщения водой, непрерывно поступающей и почти полностью испаряемой растением в атмосферу. Процесс физиологического испарения влаги растительностью, называемый транспирацией, требует очень больших расходов воды. В табл. 11 приведены величины коэффициента транспирации $K_т$, т. е. объема (веса) транспирированной растениями воды за вегетационный период, приходящейся на единицу веса (1 т или 1 ц) всего сухого вещества урожая, включая солому и т. п. [133].

Таблица 11

Коэффициенты транспирации $K_т$ некоторых культур

Культура	Коэффициент транспирации	Культура	Коэффициент транспирации
Пшеница	271—639	Рис	395—811
Рожь	431—634	Горох	563—747
Ячмень	404—664	Просо	177—367
Овес	423—876	Сахарная свекла	304—377
Кукуруза	239—495	Хлопчатник	368—650
Подсолнечник	490—577	Капуста	250—600
Картофель	285—575	Клевер	330—731
Томаты	500—650	Люцерна	568—1068

Количество воды R на 1 га, необходимое растениям в период вегетации и равное $R=K_тy$, определяется в зависимости от вида культур и запланированного веса урожая x с 1 га (зерна, плодов, хлопка-сырца и т. п. при обычной их влажности), причем $y=\rho x$, где ρ — переходный коэффициент от основной продукции урожая к весу всего сухого вещества урожая [133].

Для практических мелиоративных расчетов часто применяется другая величина — коэффициент водопотребления.

Водопотреблением называется расход воды за вегетационный период в кубических метрах на 1 га возделываемой культуры. В основном водопотребление складывается из расхода на транспирацию и испарение поверхностью почвы. За вегетационный период испарение поверхностью почвы составляет примерно $^1/_2$—$^1/_4$ часть от расхода воды на транспирацию [19]. В течение всего года почва испаряет приблизительно столько же, сколько и растения на той же площади.

Коэффициент водопотребления — это объем (или вес) воды, израсходованный за период вегетации на единицу веса урожая (табл. 12). Этот коэффициент определяется экспериментально, по

методу водного баланса, и на основе многолетних наблюдений на оросительных системах. Величины коэффициентов водопотребления и транспирации изменяются в зависимости от климатических и почвенных условий, вида растений, уровня агротехники, величины урожая, наличия удобрений, режима и способов полива и т. д.

Таблица 12

Величины коэффициентов водопотребления для среднесухого года, м³/ц

Культура	Урожай, ц/га								
	20	30	40	50	100	200	300	500	700
Засушливая зона, Средняя Азия									
Хлопчатник . .	250—230	220—200	200—190	180—160					
Степная зона									
Зерновые . . .	130—110	110—90	90—70	70—60	—	—	—	—	—
Кукуруза . . .	—	—	90—80	80—60	50—40	—	—	—	—
Многолетние травы	—	—	—	95—85	60—30	40—30	—	—	—
Сахарная свекла	—	—	—	—	—	—	13—11	10—3	8—6
Овощные . . .	—	—	—	—	27—24	23—20	19	13—10	—
Картофель . . .	—	—	—	60—70	40—30	—	—	—	—

Запасы почвенной влаги, расходуемые на транспирацию и испарение с поверхности почвы, восполняются в той или иной мере атмосферными осадками (частично и конденсацией влаги в почве в ночное время).

Поглощение осадков бесструктурными почвами составляет 25—30%, а поглощение осадков структурными почвами — 85% годового количества. Однако при небольшом количестве осадков одна агротехника не может обеспечить запланированного урожая.

Общее количество осадков за год также не является достаточным показателем увлажнения почвы, необходимого для растений. Важно, чтобы наличие влаги в почве соответствовало потребностям растений. Прежде всего влага требуется в начальную фазу развития растения и его корневой системы (для озимых культур — осенью, для яровых — весной), а затем — по мере роста растений. На Украине, например, нередко бывают в целом влагообильные годы, но отсутствие дождей в мае оказывается гибельным для кукурузы и других яровых культур, в то время как озимая пшеница с развитой корневой системой такие периоды переносит успешно. Неблагоприятные условия для нее бывают осенью, после посева, и т. п. Аналогичные условия для сельскохозяйственных культур

складываются иногда также в Орловской, Московской и даже в Ленинградской областях.

Общий глубокий недостаток влаги для растений наблюдается в южных и юго-восточных районах страны — Нижнем Поволжье и Заволжье, Южном Казахстане, Закавказье и Средней Азии. Недостаточное и неустойчивое увлажнение свойственно Центральным черноземным областям, югу и юго-востоку Украины, Центральному Казахстану и другим районам. Неблагоприятное для растений распределение осадков, как отмечено выше, наблюдается даже на широтах Ленинграда.

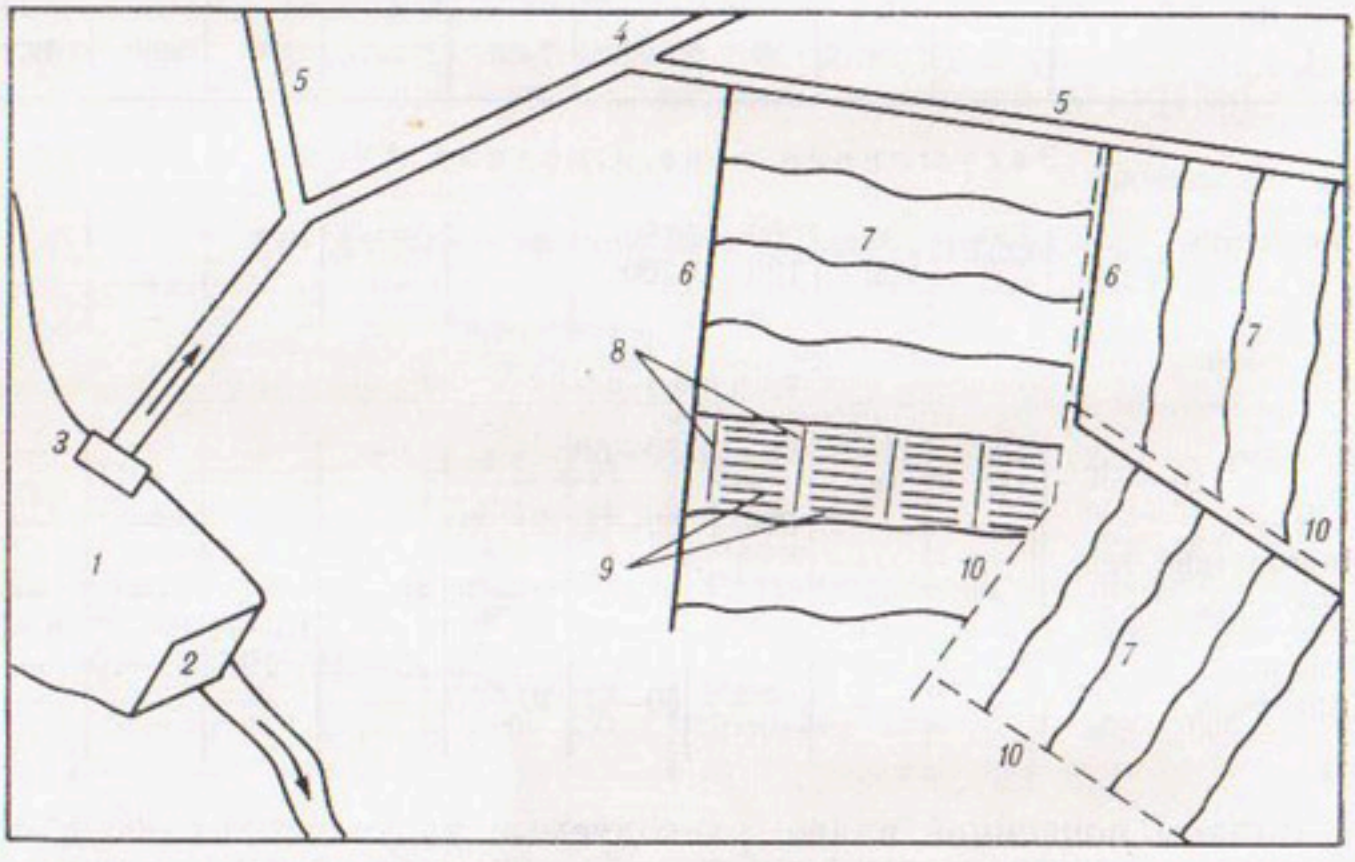


Рис. 5. Схема оросительной системы.

1 — водохранилище, *2* — плотина, *3* — насосная станция, *4* — магистральный канал, *5* — межхозяйственный распределитель, *6* — внутрихозяйственные распределители, *7* — временные оросители, *8* — выводные борозды, *9* — поливные борозды, *10* — сбросная сеть.

Таким образом, орошение (наряду с водоотведением в необходимых случаях) в неодинаковой мере требуется для различных районов и культур, для получения высоких и устойчивых урожаев на очень больших пространствах нашей страны.

В СССР систематическое орошение проводится на юге и юго-востоке, а нерегулярное — в других районах в зависимости от вида растений. Так, в центральных областях (Курская и др.) успешно практикуется орошение для зерновых культур, а в Московской, Горьковской и Ленинградской областях и даже на Крайнем Севере — для овощей.

Вода для орошения выводится из реки или подпорного бьефа на ней и по системе каналов поступает к самим растениям. Такая система называется самотечной. При этом отметки уровня воды на выходе ее из головного сооружения должны быть командными,

т. е. такими, которые с учетом необходимого уклона обеспечивают поступление воды по системе каналов на любой участок поля. При современном уровне электрификации и производства насосов часто применяется машинный подъем воды из источника в магистральный канал (рис. 5).

Различают следующие виды орошения:

увлажнительное — для обеспечения водного питания растений. Оно делится на систематическое, или регулярное, и однократное — паводковое и лиманное, широко применяемое в Ростовской области, юго-восточном Заволжье и Северном Казахстане;

удобрительное — с целью внесения в почву питательных веществ речными водами или бытовыми стоками городов;

отеплительное — для согревания почвы;

почвоочищающее — для удаления солей из почвы и уничтожения вредителей.

При регулярном орошении применяются следующие способы полива:

1) поверхностные, или наземные: а) полив напуском, б) по бороздам и в) затоплением (для риса);

2) дождевание — при помощи специальных дождевальных аппаратов, выбрасывающих под напором струи в воздух, создавая искусственный дождь;

3) подпочвенное орошение — системой подземных водоводов (пористых труб, желобов и т. п.) вода вводится в глубь почвы, откуда гравитационным, пленочным и капиллярным перемещением расходится по всем направлениям.

В зависимости от влажности почвы, метеорологических условий и вида возделываемых культур производится от двух до пяти и более поливов за период вегетации. Количество воды ($м^3$/га), потребное на один полив, называется поливной нормой, а на весь вегетационный период (на все поливы) — оросительной нормой.

Поливные нормы ($м^3$/га) в зависимости от вида культур:

При поверхностном поливе	500—950
При дождевании	100—400

Оросительные нормы ($м^3$/га) для некоторых культур:

Овощные культуры в Ленинградской и смежной с ней областях	1 000—2 500
Овощные культуры в центральных областях	1 500—3 500
Зерновые культуры в южных областях	2 700—3 500
Сахарная свекла	3 500—4 000
Хлопчатник	6 500—7 000
Травы в южных областях	6 700—7 400
Рис	
в Приморском крае	7 000—10 000
в плавнях р. Кубани	15 000—21 000
в долине р. Чирчик (УзбССР)	10 000
в долине р. Чу	22 000
в долине р. Зеравшан	58 000

Режим орошения, т. е. совокупность количества поливов, сроков их проведения и размеров поливных норм, зависит от типа почв, их влажности, агротехники, метеорологических условий, вида культур и способа полива.

Режим поливов отдельных культур намечается с учетом местных условий, многолетних наблюдений за погодой и на основе местной оросительной практики.

Наметив предварительно поливной режим, составляем поливной график. Пусть орошаемая площадь ω га засеяна культурами a, b, c, занимающими соответственно доли α, β, γ от всей площади ω. Если для культуры a принять, что m_{a1}, m_{a2}, m_{a3} — поливные нормы, t_{a1}, t_{a2}, ... — длительность первого, второго и т. д. поливов в сутках, T_{a1}, T_{a2}, ... — число часов полива в сутки, то поливные расходы для этой культуры будут следующие:

для первого полива

$$Q_{a1} = \frac{m_{a1}\alpha\omega}{t_{a1}T_{a1} \cdot 3600} \text{ м}^3/\text{с} = \frac{m_{a1}\alpha\omega}{3{,}6T_{a1}t_{a1}} \text{ л/с}, \qquad (11)$$

для второго полива

$$Q_{a2} = \frac{m_{a2}\alpha\omega}{3{,}6T_{a2}t_{a2}} \text{ л/с и т. д.}$$

Аналогично вычисляются расходы для поливов культур b, c и т. д.

Если расход определить на единицу площади, получим так называемый оросительный гидромодуль. Для культуры a, например, оросительный гидромодуль первого полива равен

$$q_{a1} = \frac{m_{a1}\alpha \cdot 1}{3{,}6T_{a1}t_{a1}} \text{ л/с на 1 га.} \qquad (12)$$

Расходы воды отдельно для каждой культуры наносятся на график, охватывающий все поливы с их намеченными сроками. Ординаты, относящиеся к разным культурам, но совпадающие по времени, суммируются. В результате получается так называемый неукомплектованный график гидромодуля нетто.

Различают суммарный и удельный графики гидромодуля нетто. Первый относится ко всей системе, а второй к площади в 1 га, но с таким же составом и долевым соотношением на ней культур, как и по системе в целом. Следовательно, первый график получается из второго умножением ординат на ω. При определении расходов по длине каналов, пропускной способности сооружений или мощности насосных станций удобно пользоваться удельным графиком.

Для построения удельного графика надо знать:

1) состав и процентное соотношение культур системы; если они неодинаковы для всей площади системы, то и для отдельных ее частей;

2) поливные и оросительные нормы, число и сроки поливов;

3) режим стока в источнике орошения.

Суммарный график гидромодуля нетто для небольшого поля (500 га) показан на рис. 6. На этом графике видно, что суммарный расход по времени резко изменяется — от 50 до 350 л/с, а в некоторые дни поливы даже отсутствуют. Из этого следует, что пред-

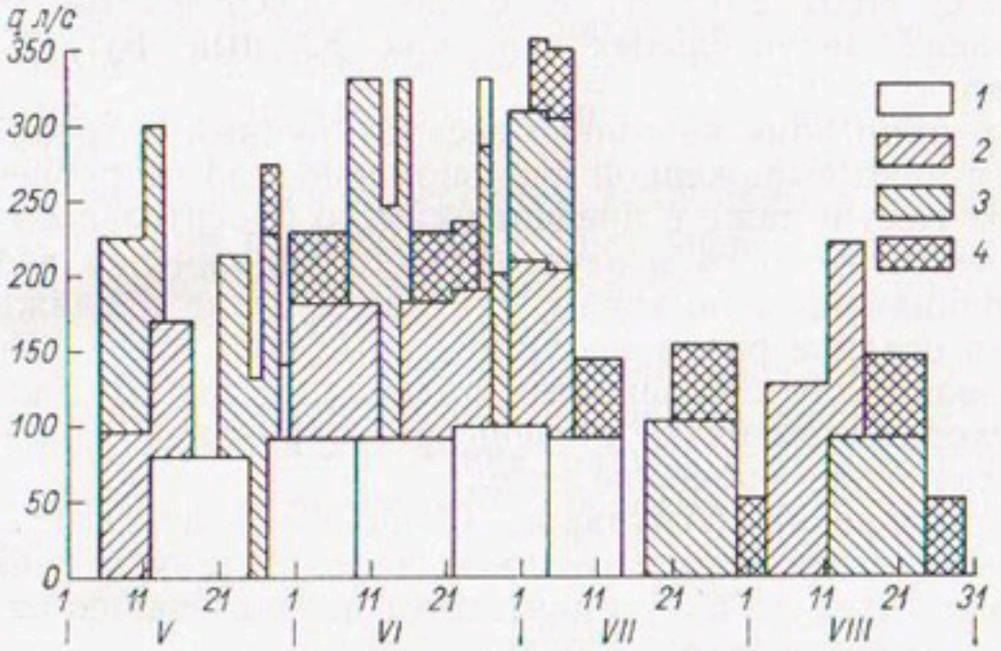


Рис. 6. Неукомплектованный график поливов.

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

варительно намеченный режим поливов затруднил бы использование рабсилы, техники, транспорта и привел к излишним затратам на устройство каналов и сооружений, так как их пришлось бы рассчитывать на чрезмерные расходы воды.

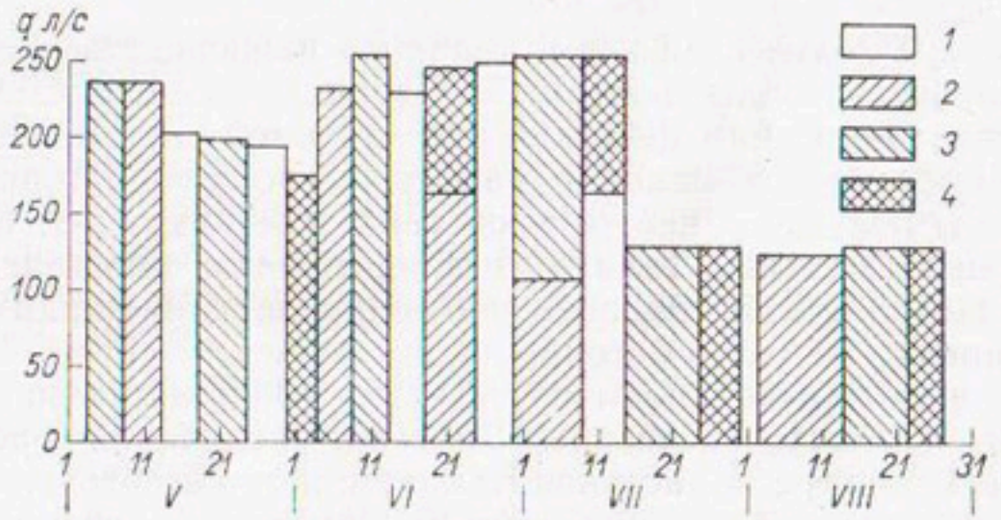


Рис. 7. Укомплектованный график поливов.

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

Сокращением сроков полива и небольшим их смещением удается устранить поливные пики, не изменяя существенно средние даты поливов. Это и показано на окончательном укомплектованном графике (рис. 7).

Для нормального водообеспечения культур оросительные системы юга Европейской территории СССР по современным требованиям должны удовлетворять гидромодулю, равному примерно 0,5 л/с на 1 га. Для площади в 50 тыс. га это составляет расход воды 25 м³/с, т. е. весь обеспеченный меженный расход таких значительных рек как Южный Буг, Северский Донец и др.

Однако ирригация не только весьма крупный потребитель, она отличается ярко выраженной неравномерностью потребления воды в пределах года и даже в пределах самого оросительного периода. В зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения водопотребление неодинаково и по годам, так как в сухие и влажные годы количество осадков различно. Отмеченные обстоятельства нередко обусловливают для большинства равнинных рек с малыми летними расходами высокую степень регулирования стока при использовании его на орошение земель.

На горных реках (Амударье, Сырдарье и других) с преимущественным ледниковым и горно-снеговым питанием наблюдается летнее половодье, что благоприятствует использованию их для орошения. Однако в недалеком будущем наряду с широким проведением мероприятий против потерь воды при орошении развитие ирригации потребует регулирования стока и этих рек.

Выпускаемые на поля расходы воды представляют оросительное водопотребление — нетто. Часть воды теряется на фильтрацию по мере того, как она проходит в магистральном, межхозяйственном, внутрихозяйственных, временных каналах оросительной системы (см. рис. 5). Борьба с фильтрацией ведется путем крепления дна и стенок каналов (потеря воды на испарение в них незначительна).

Отношение количества воды, поданной непосредственно на поля $W_н$, к количеству воды, взятой из источника $W_{бр}$, называется коэффициентом полезного действия оросительной системы. В зависимости от состояния каналов и размеров орошаемой площади коэффициенты полезного действия системы изменяются от 0,55—0,60 при обычных земляных каналах и значительных площадях орошения до 0,80—0,90 при сравнительно небольших площадях и креплении основных каналов бетонировкой.

Расчет каналов начинают вести от внутрихозяйственных, затем переходят к межхозяйственным и т. д., увеличивая пропускную способность по мере нарастания расходов нетто и потерь.

Головное водозаборное сооружение рассчитывается на максимальный расход по укомплектованному графику поливов плюс потери по трассе каналов. Эти потери и поданная на поля вода частично возвращаются в реки через дренажную сеть и в виде грунтового потока.

Вопросы орошения освещаются в работах [19, 53, 81, 98, 133] и др.

Гидроэнергетика

Сток на гидростанциях (ГЭС) используется для получения энергии, потребность в которой изменяется как в пределах суток, так и в течение года соответственно суточному и годовому графикам нагрузок ГЭС. В пределах суток нагрузки колеблются от минимума ночью до максимума в дневные и вечерние часы (рис. 8). В выходные и праздничные дни, общее число которых в пределах недели бывает от 1 до 3, нагрузки резко снижаются. Суточные графики нагрузки строятся по средним величинам в интервале каждого часа. Но при решении некоторых энергетических задач, например при выборе установленной мощности ГЭС, учитываются и мгновенные максимальные нагрузки.

Основные показатели графика суточной нагрузки:

а) коэффициент внутрисуточной равномерности, или коэффициент полноты суточного графика, равный отношению средней суточной нагрузки к максимальной среднечасовой (аналогично для недели и месяца),

$$\gamma_{сут}=\frac{\overline{P}_{сут}}{P_{макс}};\quad \gamma_{нед}=\frac{\overline{P}_{нед}}{P_{макс}};\quad \gamma_{мес}=\frac{\overline{P}_{мес}}{P_{макс}},$$

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

$$\beta=\frac{P_{мин}}{P_{макс}}.$$

Значения этих коэффициентов зависят от состава потребителей, наличия ночных смен на предприятиях и т. п. В общем $0\leqslant\beta\leqslant 1$, $\beta\leqslant\gamma_{сут}\leqslant 1$. Коэффициент $\gamma_{сут}$ для суммарной коммунально-бытовой нагрузки городов равен зимой 0,45—0,57, летом 0,25—0,40, а для электроемких производств достигает 0,96. Для системы в пределах месяца $\gamma_{мес}=0{,}88\div 0{,}93$. Годовой ход максимумов коммунальной нагрузки, т. е. наибольших суточных среднечасовых пиков электропотребления, показан на рис. 9. Летом максимумы сравнительно невелики, а зимой наибольшие. В сельскохозяйственных районах с машинным орошением наибольшие максимумы наблюдаются летом.

Пунктирная линия на рис. 9 показывает статическое состояние энергосистемы (не учитывает прироста потребителей в течение года) и строится для облегчения анализа режима нагрузок. Сплошная линия отражает рост нагрузки системы, который учитывается коэффициентом δ, равным отношению годового максимума P_2 к максимуму в начале года P_1. Для энергосистем СССР $\delta=1{,}10\div 1{,}20$ и более [12].

Летний наименьший максимум для большинства энергосистем составляет $P_л=(0{,}70-0{,}90)P_1$.

Для водноэнергетических расчетов (гл. X) необходим также график среднемесячных нагрузок (мощностей). По этому графику составляется годовой баланс энергии, который является исходным

при расчете суточных графиков нагрузки и годового графика максимумов.

Среднемесячные нагрузки $\overline{P}_{мес}$ определяются по месячным максимумам $P_{макс}$

$$\overline{P}_{мес} = \gamma_{сут}\gamma_{мес}P_{макс}.$$

Расход электроэнергии для разных видов потребителей устанавливается по удельным нормам.

В промышленности удельные нормы относятся к единице выпускаемой продукции: тонне, кубометру, на 1000 руб. стоимости валовой продукции и т. д. В ряде производств энергия потребляется в больших количествах. Машиностроение, топливная, горно-

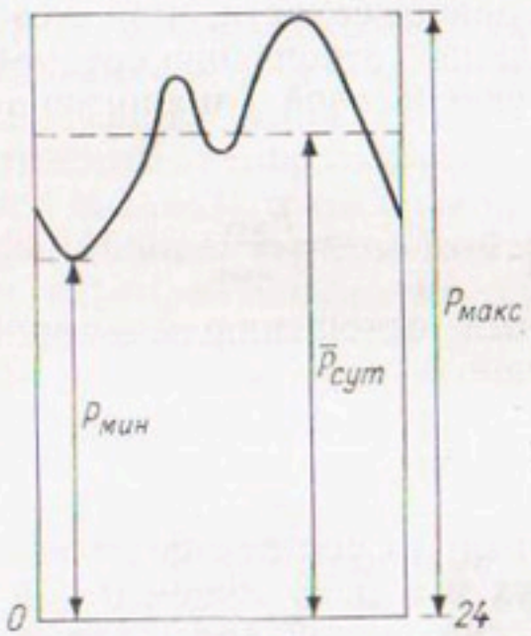


Рис. 8. Суточный график нагрузки энергосистемы.

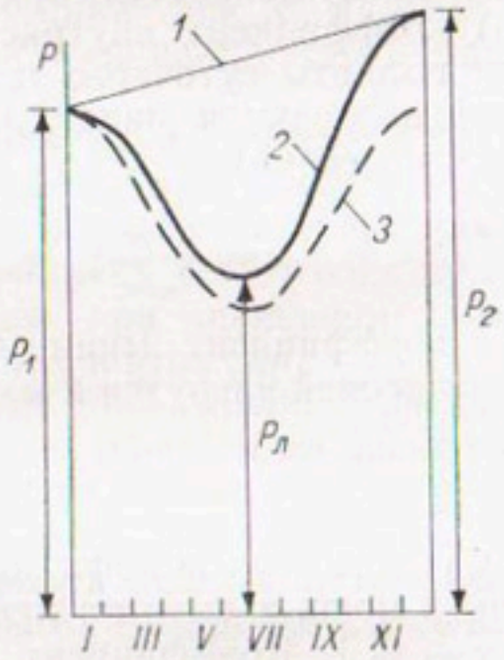


Рис. 9. Годовой график максимумов нагрузки.

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

рудная и некоторые виды химической промышленности потребляют до 100 кВт·ч на 1 т готовой продукции. От 100 до 1000 кВт·ч на 1 т используют так называемые среднеэлектроемкие производства чугуна, электростали, нефти. Свыше 1000 кВт·ч на 1 т расходуется на электроемкие технологические процессы в химической, бумажной и других отраслях промышленности. Встречаются потребители с удельной нормой выше 18 000 кВт·ч на 1 т (производство металлического алюминия, электролиз магния) и даже 50 000 кВт·ч на 1 т (добыча никеля).

В коммунальном хозяйстве принимают сводную норму энергопотребления из расчета на одного жителя. Сюда относится расход энергии на освещение жилых домов, общественных зданий, улиц, на бытовые приборы, радио и телевизоры, на водопровод, канализацию, городской транспорт и т. д. В современных условиях на одного жителя в небольших городах расходуется до 200 кВт·ч,

в крупных — до 600 кВт · ч в год. В дальнейшем, при более широкой электрификации быта (включая отопление, приготовление пищи и т. п.) расход энергии значительно увеличится. На электрифицированном железнодорожном транспорте электропотребление исчисляется в Вт · ч на 1 ткм, а в предварительных расчетах — в кВт · ч на 1 км пути в год.

В зависимости от грузонапряженности, профиля и назначения дороги расход энергии на 1 км в год оценивается в 400—500 тыс. кВт · ч при современном и 500—750 тыс. кВт · ч при перспективном уровне развития народного хозяйства. Специфическим отличием электропотребления железных дорог являются так называемые «блуждающие пики», т. е. кратковременные резкие повышения нагрузки, могущие возникнуть в различные, неизвестные заранее моменты времени.

Сельскохозяйственное электропотребление рассчитывается на коммунально-бытовые нужды и на сельскохозяйственное производство по специальным нормам. Расходы энергии на машинное орошение (кВт · ч на 1 га) определяются в зависимости от величины оросительных норм, способов полива и высоты подъема воды.

Примерные показатели энергопотребления для ирригации (в кВт · ч на 1 га) для отдельных областей составляют [12]:

Волгоградская и Астраханская	1700—1750
Саратовская	1100—1150
ЦЧО	1200—1250

При определении суммарного расхода электроэнергии необходимо наряду с удовлетворением всех потребителей учитывать расход энергии на собственные нужды электростанции и на потери в электросетях. В зависимости от их протяженности, нагрузки и т. п. потери составляют 5—15% энергии, отпускаемой в сеть. Собственные нужды установки требуют расхода на ГЭС не более 1%, на ГРЭС 6—10% выработки энергии.

Вопросы гидроэнергетики излагаются в работах [29, 61, 73, 145 и др.].

Водный транспорт

Водный транспорт (судоходство, лесосплав) в прежние годы предусматривался на больших реках, но в последнее время все в большей степени в качестве водных путей стали использоваться средние и даже малые реки. Новейшие суда с небольшой осадкой и реактивным водометным устройством вместо гребного винта позволяют широко и эффективно использовать для водного транспорта и малые реки.

В настоящее время общая протяженность действующих водных путей в стране составляет около 145 тыс. км. Требования водного транспорта сводятся к тому, чтобы во время навигации на водных путях поддерживались безопасность движения и необходимые для плавания габариты пути: глубина, ширина и радиус закруглений.

Безопасность движения обеспечивается созданием вдоль по реке определенной сигнализации и расстановкой по берегам знаков, принятых на водных путях, подобно тому, как это соблюдается на шоссейных дорогах.

Габариты пути определяются соответственно местным транспортным потребностям и возможностям, типам судов и размерам лесосплавных единиц (плоты, кошели и т. п.).

Судоходство на некотором участке реки или по всей ее длине обеспечивается при соблюдении установленной минимальной гарантийной глубины судового хода, при которой и остальные размеры пути должны быть не менее расчетных. В каждом пункте по реке эта глубина отсчитывается от отметки низкого меженного горизонта, называемого проектным, на ближайшем опорном водпосту. Отметки проектного горизонта вдоль реки находятся для каждого из нескольких опорных водпостов по многолетней кривой продолжительности средних суточных горизонтов за период навигации при заданной продолжительности расчетного уровня (в % навигационного времени).

В зависимости от значения реки или ее участка как транспортного пути продолжительность расчетного уровня принимается: для водных магистралей 95—99% (т. е. в среднем за многолетние 1—5% дней навигационного периода уровень стоит ниже проектного, а 95—99% превышает его или равен ему); для путей местного значения 93—96%; для подъездных путей 90—96%.

Поддержание гарантийной глубины на судовом ходе достигается различными мероприятиями (см. § 1). Наиболее радикальным из них является шлюзование реки, т. е. превращение ее в достаточно глубоководные подпорные бьефы при помощи плотин со шлюзами. Иногда шлюзование является мероприятием по использованию реки исключительно для транспортных целей, соответственно чему определяются высоты водоподъемных плотин и размеры шлюзов при них. В таком виде шлюзованы реки Москва, Ока, Шексна, нижние участки Северского Донца, Дона и др.

В большинстве же случаев подпорные бьефы создаются в виде больших водохранилищ, которые используются не только для водного транспорта местного или транзитного (при устройстве шлюза у плотины), но и для других целей.

Для оценки влияния подпора уровней на увеличение судоходных глубин необходимо построить две кривые свободной поверхности: 1) в бытовых условиях и 2) при подпоре. Обе кривые строятся по расходу, отвечающему проектному горизонту. При подпоре кривая приурочивается к минимальной навигационной отметке уровня воды у сооружения, соответствующей времени возможного прохождения по реке указанного расхода. При наличии (выше по течению) другого водохранилища, регулирующего сток, упомянутые кривые строятся по зарегулированным расходам воды. Разница ΔZ между отметками подпорной и бытовой кривых даст приращение горизонта, причем увеличение глубины за счет подпора составит примерно $^2/_3\Delta Z$.

Если полученное за счет подпора увеличение минимальной гарантийной глубины не удовлетворяет требованиям водного транспорта, то при наличии возможности следует повысить отметку допустимой навигационной сработки водохранилища.

Водопотребление водного транспорта на шлюзованных реках сводится к расходованию воды на шлюзование и на пополнение потерь из подпорных бьефов. Расход воды на шлюзование $Q_{ш}$ подсчитывается как произведение объема сливной призмы шлюза $W_{ш}$ на число шлюзований в сутки (ч), пересчитанное осредненно на единицу времени (с) за этот интервал. Для уменьшения этого расхода следует по возможности соблюдать пропуск встречных транспортов одним шлюзованием.

На всем каскаде шлюзов расходы учитываются один раз — из нижнего водохранилища. Для волжского каскада на шлюзование расходуется в среднем 1,26 км³/год воды (40 м³/с), или 0,5% объема стока в средний год, для днепровского — 0,63 км³/год воды (20 м³/с), или 1,2%, для Дона — 0,2 км³/год воды (6,4 м³/с), т. е. 1%. По отдельным ступеням каскада поступление воды из шлюза верхней ступени $Q_{ш.в}$ и расход на собственное шлюзование $Q_{ш.с}$ могут быть различными. Это зависит от того, какие порты вдоль реки являются отправными или приемными пунктами для большинства грузо-пассажирских и лесосплавных потоков, а также от разности $W_{ш.с} - W_{ш.в}$. Для первого сверху шлюза $Q_{ш.в}=0$, поэтому $Q_{ш}=Q_{ш.с}$.

Потери воды из подпорных бьефов происходят путем: а) фильтрации из чаши водохранилища и в обход подпорных сооружений; б) испарения с водной поверхности бьефа; в) утечки через неплотности затворов плотин и шлюзов, весьма ощутимые для малых рек; г) утечки через закрытые направляющие аппараты турбин. Вопрос о потерях воды изложен в гл. III.

К мероприятиям, обеспечивающим судоходство на нешлюзованных участках некоторых рек, относится регулирование стока и создание попусков для увеличения расходов и глубин на мелководных участках. Но это дорого и не очень эффективно, а потому с особым назначением для водного транспорта применяется редко.

Известен, например, Верхневолжский бейшлот — водохранилище в районе истока Волги, построенное в первой половине XIX в. и восстановленное в расширенном и улучшенном виде в годы Великой Отечественной войны. При помощи этого водоема используется весь годовой сток для навигационных попусков, создающих возможность судоходства почти от истока Волги до г. Калинина. Однако попусковое поддержание судоходных глубин наряду с решением других водохозяйственных задач встречается часто.

Так, Рыбинский гидроузел при нормальной работе входящей в его состав гидростанции, обеспечивал также судоходные глубины на участке от Рыбинска до устья р. Оки, когда еще не было Горьковской ГЭС. Влияние попусков отмечалось и на более отдаленных участках Волги. Аналогичные функции выполняла

ДнепроГЭС им. В. И. Ленина (до строительства Каховской ГЭС), а также выполняют известные мощные гидростанции на Каме, Куре, Иртыше, Дону и др.

Размеры судоходных попусков определяются в зависимости от заданной транзитной (т. е. допускающей сквозное плавание по всему участку) глубины. При этом решающими являются наиболее трудно проходимые, «нормирующие» глубину перекаты.

При поддержании транспортных глубин надо иметь в виду, что мероприятия по повышению их за счет дополнительных кратковременных попусков из выше лежащего водохранилища являются малоэффективными. Дело в том, что влияние кратковременных попусков распространяется на сравнительно небольшие расстояния, а размеры повышения глубин за счет таких попусков невелики; для существенного приращения глубин потребовалось бы водохранилище очень большой емкости.

Ограниченное влияние попусков на глубину вытекает из обычной параболической связи между наполнением и расходами

$$Q=kh^n,$$

где k — коэффициент пропорциональности; h — наполнение призматического русла с постоянным уклоном; n — показатель, большей частью близкий к двум.

Из приведенного соотношения видно, что для увеличения глубины вдвое расход нужно увеличить вчетверо. Поэтому по мере увеличения бытовых расходов вниз по реке влияние попуска становится все менее заметным, хотя вблизи самого водохранилища крупные попуски могут вызвать нежелательное повышение горизонтов и скоростей. Дополнительное питание будет более целесообразным для водного транспорта, если оно подключается в отдельных точках по длине реки из водохранилищ, расположенных на притоках по возможности недалеко от их устьев.

Однако при русле в размываемых породах (т. е. почти на всех судоходных реках) указанное соотношение между Q и h нарушается деформациями русла в связи с изменением расхода воды. Подъему уровня воды обычно соответствует намыв гребней перекатов, несколько уменьшающий прирост глубины. В результате приращение глубины составляет в среднем лишь около $^2/_3$ приращения уровня. Если бытовую глубину $h_б$, отсчитываемую от проектного горизонта $Z_б$ на опорном водпосту, намечено увеличить на Δh, значит надо повысить горизонт на $\Delta Z=\Delta h:{}^2/_3$, чем и определится величина установившегося попускового расхода ΔQ. В результате имеем:

$$h_п=h_б+\Delta h,\quad Z_п=Z_б+\Delta Z,\quad Q_п=Q_б+\Delta Q,$$

где $h_п$, $Z_п$, $Q_п$ — проектные минимальные глубина, отметка уровня и расход воды при попусках [$Q_п$ соответствует отметке $Z_п$ по зависимости $Q=f(Z)$ для водпоста]; $h_б$, $Z_б$, $Q_б$ — то же в бытовых условиях; Δh, ΔZ, ΔQ — приращения тех же элементов при попусках.

К мероприятиям по обеспечению водного транспорта относятся также «путевые работы»:

а) руслоочищение — очистка фарватера или всего русла и берегов от предметов, загромождающих русло: камней, корневищ, затонувших бревен и т. п.;

б) дноуглубление — увеличение глубин в пределах судового хода при помощи землечерпания, устройства прорези и удаления грунта;

в) выправление русла путем спрямления или устройства выправительных сооружений, чтобы сузить и изменить направление потока, придать желаемую форму и глубину судовому ходу, защитить от размыва берега и т. п.

Транспортные условия характеризуются кривыми зависимости глубин на перекатах от расходов воды. Эти кривые строятся по данным ближайших пунктов наблюдений; используются также промеры бакенщиков и теоретические зависимости между расходами, уровнями и глубинами.

Кривые, приведенные на рис. 10, показывают величины расходов, которые должны быть на перекатах по фарватеру для соблюдения тех или иных нормирующих глубин. На том же рисунке видно, на каких перекатах следует улучшить судоходные условия путем землечерпания и, таким образом, применить комбинированный способ поддержания необходимых глубин.

Для перекатов, изменяемых землечерпанием, должны быть проведены новые кривые на рис. 10, чтобы установить величины необходимых расходов для сравнения с таковыми в других створах. Так контролируется намеченный объем землечерпательных работ, которые могут быть избыточными или недостаточными. При определении дополнительных (попусковых) расходов для поддержания заданной глубины должно учитываться нарастание расходов по длине реки.

Для расчета объема воды, который должен быть зарезервирован на поддержание судоходных глубин, выбирается несколько лимитирующих перекатов, для которых вычерчиваются годовые гидрографы ежедневного стока с низкими расходами воды за период навигации (годы с низкой навигационной меженью должны быть в пределах расчетной обеспеченности). Гидрографы перестраиваются в графики глубин, на которые наносится нормирующая глубина. Затем на гидрографах каждого года из числа рассматриваемых, пользуясь кривой расходов, наносится линия необходимых расходов. Так на каждом гидрографе образуется площадь графика между фактическим гидрографом и необходимым, дающая объем попуска.

За расчетный график попусковых расходов принимается такой, ордината которого в каждый момент равна наибольшей из ординат (попусков) по отдельным перекатам (огибающая кривая). Планиметрированием площадки попусковых расходов (полученных из рассмотрения принятого гидрографа), ограниченной огибающей

кривой и осью абсцисс, находится необходимый объем длительных попусков для поддержания судоходных глубин.

На основе той же кривой с учетом притока к водохранилищу и потерь из него определяется режим водохранилища, а также его объем. При этом, как при всяком компенсирующем регулировании, необходимо соблюдать требование, чтобы естественный сток, уч-

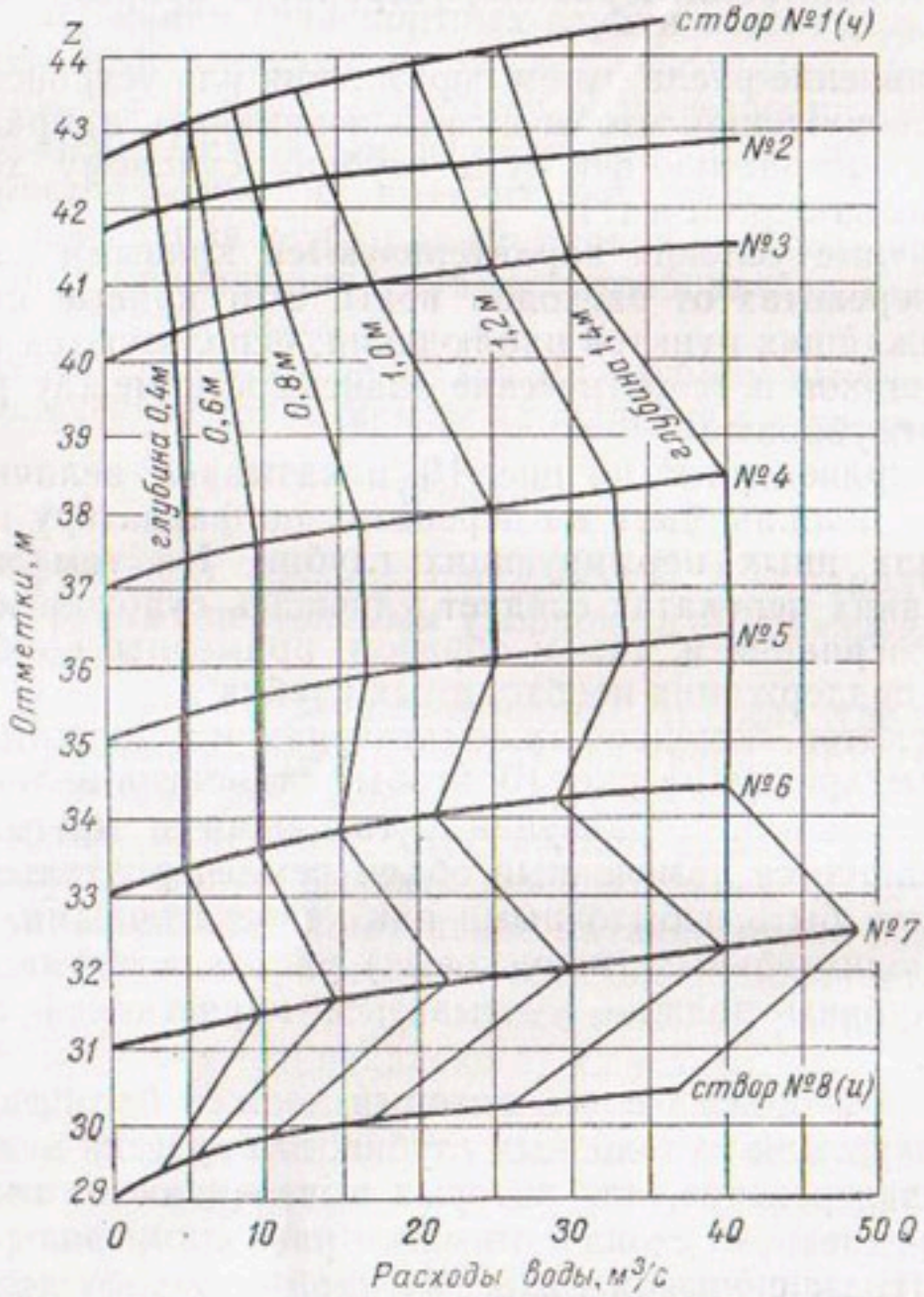


Рис. 10. Кривые расходов на перекатах. Река С, участок Ч—И.

тенный при определении дефицитов на низовых, незарегулированных участках реки, не включался при расчете водохранилища, а принимался как пропускаемый транзитом. В заключение отметим, что водный транспорт при наличии ГЭС выступает и как фактор ограничения режима работы водохранилищ и гидростанций.

В верхнем бьефе в конце навигации, к началу зимы, должны соблюдаться заданные глубины на подходах к шлюзам и на их королях. При этом в зонах выклинивания подпора и сопряжения его с лежащей выше ступенью нередко применяется землечерпание.

В нижнем бьефе ГЭС, если он является свободным или слабо-

подпертым участком реки, амплитуда колебания и быстрое изменение уровней и скоростей течения в результате суточного регулирования мощности ГЭС становятся наиболее существенными. При некоторых значениях этих показателей судоходство затрудняется и возникает необходимость ограничения пиковых расходов и повышения минимумов, хотя это и невыгодно для ГЭС: ее установленная мощность будет недоиспользована для пиковой части графика нагрузок. Таким же образом сказываются недельные колебания в режиме работы ГЭС, вызываемые падением нагрузки в энергосистеме в предвыходные, выходные и праздничные дни.

При свободных нижних бьефах часть емкости водохранилища используется, как показано выше, для судоходных попусков. Хотя они и проходят через турбины, но не соответствуют наиболее выгодному режиму ГЭС, вызывая преждевременную летне-осеннюю сработку и снижая ресурсы установки (напор и запасы воды) для сезона наибольших нагрузок — зимы.

Режим транспортных попусков и условия расчета попусковых водоемов освещаются в книгах [70, 91]. Вопросы водного транспорта (в том числе и потребность воды для него) изложены в работах [11, 12].

Рыбное хозяйство

На рыбное хозяйство серьезное воздействие оказывает гидротехническое строительство. Плотины прекращают доступ рыб к их нерестилищам и нарушают воспроизводство морских проходных рыб (осетра, стерляди, севрюги, семги и др.), поднимающихся для икрометания в реки.

Регулирование стока Волги, Дона, Куры, Днепра и других рек оказывает влияние на низовые неподпертые участки, изменяет условия воспроизводства рыбных запасов. Созданные, например, в бассейне Волги водохранилища при эксплуатации их по плану, наиболее желательному для энергетики и водного транспорта, настолько сглаживали бы весенние половодья в низовьях Волги в средние по водности и маловодные годы, что естественные нерестилища в дельте реки не заливались бы. В настоящее время Куйбышевское и Волгоградское водохранилища в средние по водности годы дают попуски на нижний участок в размере 25 тыс. м^3/с в течение 20 суток в мае и июне или 43,2 км^3 для поддержания условий размножения полупроходных рыб (леща, судака, сазана, воблы). Сброс значительной части этой воды мимо турбин, а также вызванное этим снижение напоров на двух ГЭС приводят к уменьшению выработки ими энергии. Понижается и обеспеченность судоходных попусков.

Создание Цимлянского водохранилища на Дону привело к прекращению весенних затоплений поймы в нижнем бьефе в годы средней и малой водности. В многоводные же годы продолжительность весеннего затопления поймы сократилась по сравнению

с естественными условиями с 60 до 30—40 дней, т. е. примерно в 2 раза.

Понижение уровня воды зимой на водохранилище Кременчугской ГЭС приводит к массовой гибели рыбы, прижимаемой ко дну оседающим льдом в пределах прежней очень широкой поймы. В весенний период сработка водохранилищ губительна для отложенной на мелководье икры. На Куйбышевском водохранилище весной 1960 г. наблюдалось ее обсыхание в связи с попусками для обводнения нерестилищ в низовьях реки.

Определенный ущерб рыбному хозяйству наносит забор воды из рек для орошения. Использование без рыбозащитных устройств многочисленных насосных установок и самотечных каналов приводит к выносу на поля в течение одного лишь сезона многих миллиардов штук молоди в низовьях Волги, Дона, Днепра и Кубани, в бассейнах Куры, Сырдарьи, Амударьи и других рек. Много молоди гибнет на частых решетках мощных водозаборов ГРЭС.

Поступление в реки неочищенных промышленных стоков, нефти и продуктов молевого лесосплава безусловно пагубно для рыбы.

Водная эрозия также причиняет ущерб рыбоводству. Продукты эрозии заносят места размножения, зимовальные ямы, мешают развитию кормовой базы.

Необходимы согласованные действия участников водохозяйственного комплекса по обеспечению всех интересов народного хозяйства, в том числе и рыбоводства. Требуется широкое проведение мероприятий по рыбоохране и строгий контроль за их выполнением.

При проектировании и эксплуатации водохранилищ режим их сработки (глубина и сроки) и режим попусков в нижний бьеф должны согласовываться с рыбохозяйственными организациями.

Наряду с ущербом, причиняемым рыбоводству, в частности в результате гидростроительства, последнее открывает широкие возможности интенсивного развития рыбного хозяйства в многочисленных обширных водохранилищах.

Однако в связи с приспособлением водохранилищ для разведения и лова рыбы возникают дополнительные требования к режиму их работы. Не допускаются, например, резкие колебания уровней водохранилищ во время нереста и позже, до появления мальков. Особенно это относится к сработке, вызывающей значительное уменьшение площади зеркала и обсыхание отложенной икры. Зимой нельзя снижать уровни до тех отметок, при которых возможно или промерзание до дна мелководных участков, или придавливание здесь рыбы в конце зимы массами льда, накопившегося при довольно высоких уровнях.

Вполне осуществимо и отчасти уже достигнуто направленное формирование промыслового стада рыб путем создания на базе водохранилищ нерестово-вырастных хозяйств и рыбоводных заводов, зарыбления всех озер, прудов и водоемов, организации государственных рыбхозов и рыбоводных ферм в сельском хозяйстве. Рыбоводные пруды должны быть обеспечены водой для наполне-

ния их, поддержания необходимой проточности и компенсации потерь из прудов на испарение, фильтрацию и утечки. При отсутствии утечек через сооружения расход воды для прудов составляет летом 0,5—0,7, зимой 1 л/с на 1 га площади зеркала.

Вопросы рыбного хозяйства освещены в работе [69].

Санитарные попуски и благоустройство территорий

Санитарные попуски при гидростроительстве относятся к специфическому водопотребителю, которым является сама река. Требуется сохранять реку в необходимом санитарном состоянии, для чего должно быть соблюдено заполнение русла водой, достаточная проточность с приемлемыми скоростями и т. п.

Санитарные попуски не нормированы. Иногда поддерживаются условия, согласно которым расходы воды в реке должны быть не ниже минимальных среднемесячных расходов в маловодном году с повторяемостью один раз в 20 лет [92]. Однако упомянутое условие не рассматривается как основа к тому, чтобы обречь реку на постоянное существование с таким лимитом. Вопрос о том, в какой мере следует соблюдать это условие и какие необходимы отклонения от него, решается в зависимости от конкретных обстоятельств, к которым относятся длина участка, нуждающегося в попуске (до ближайшего существенного притока), рыбохозяйственное значение реки, близость ее к населенному пункту, использование водотока для хозяйственно-бытовых или культурно-спортивных целей, качество воды в естественных условиях и при регулировании стока и т. д.

Если на рассматриваемом участке реки отмечается значительный расход воды для водопотребителей, расположенных ниже по течению, то вопрос о санитарных попусках отпадает.

Благоустройство территорий, примыкающих к реке, постоянно принимается во внимание при гидростроительстве, поскольку река является важнейшим элементом ландшафта и благоприятной принадлежностью населенных пунктов, исстари тяготеющих к рекам и водоемам.

По возможности водоемы следует располагать так, чтобы они содействовали благоустройству местности как формой сооружений, так и акваторией. Вместе с сооружением водоема ближайшие заболоченные площади должны быть затоплены или осушены. При выборе подпорной отметки и режима работы водоема не следует допускать значительных мелководий в теплый сезон и нового заболачивания. Береговая зона должна позволять устройство пляжей, водных станций и т. п.

Незарегулированные участки рек также требуют соответствующего ухода. По крайней мере ближайшие к населенным пунктам участки рек должны быть выправлены, расчищены, избавлены от зарастания и заболоченности.

В условиях планового социалистического хозяйства СССР водохозяйственные мероприятия на реках выполняются комплексно,

с наиболее целесообразным использованием водных ресурсов для ряда отраслей водного хозяйства, с выделением основной или ведущей отрасли и соблюдением интересов остальных претендентов на воду.

Так, существующие гидроузлы на Волге и Днепре обеспечивают гидроэнергетику, сквозное судоходство и частично ирригацию, на Дону (Цимлянский гидроузел) — энергетику, ирригацию и сквозное судоходство, на Куре (Мингечаурский гидроузел) — энергетику, ирригацию из верхнего и нижнего бьефов, судоходство на нижнем участке реки и борьбу с наводнениями.

Водное хозяйство должно рационально удовлетворять требования различных водопотребителей по следующим основным признакам: а) месту приема и выпуска воды; б) количеству и качеству воды; в) распределению водопотребления по часам суток, дням недели, сезонам года; г) надежности водообеспечения.

Место приема и выпуска воды имеет значение для повторного ее использования. Тепловые электростанции, например, выпускают воду подогретой. Подогрев выпускаемой с электростанции воды сверх естественной ее температуры при прямоточной схеме водоснабжения составляет 8—9° С летом, 11—13° С зимой и увеличивается при оборотной и смешанной схемах. Подогрев воды происходит и на других предприятиях, что мешает использованию ее для коммунального водоснабжения, рыбного хозяйства и т. д.

Забор воды для орошения из верхнего бьефа является потерей для ГЭС. Напротив, вода, пропущенная через турбины или через судоходный шлюз, может быть использована для орошения из нижнего бьефа. Но для водного транспорта она также будет бесполезна, если водозабор расположен вблизи установки. Если ресурсы ГЭС должны покрывать дефицит воды потребителя, расположенного значительно ниже по реке, то попуски для него будут использованы гидростанцией и водным транспортом. В связи с этим необходимо составлять баланс изъятия и возврата воды в верхнем бьефе и для отдельных створов по длине реки ниже плотины.

Все водопотребители (или водопользователи) имеют определенные требования по количеству и качеству воды.

Качество воды, поступающей в реку после использования ее на предприятиях, обычно резко ухудшается, причем для многих потребителей вода становится непригодной. Так, для многих производств и для рыборазведения недопустимы сточные воды химических заводов, для коммунального водоснабжения — места забора воды непосредственно ниже выпуска промышленных или коммунальных стоков и т. п.

Распределение водопотребления по времени, различное у каждого потребителя, часто приводит к повышенному расходованию воды или выполнению дополнительных водохозяйственных мероприятий. Например, для поддержания судоходных глубин на нешлюзованных участках рек гидростанция в период навигации ограничивается в возможностях суточного регулирова-

ния и должна соблюдать некоторые круглосуточные расходы, работая в это время частично в базисной части графика нагрузок. Эти расходы должны быть такими, чтобы на нормирующих перекатах соблюдались минимальные гарантированные глубины по судовому ходу, которые зависят от габарита судов, их грузоподъемности, характера движущего устройства и т. п. При шлюзовании реки на всем ее протяжении эти ограничения смягчаются или совсем отпадают и остается лишь требование об учете расходования воды на шлюзование.

Иногда вместо вынужденного режима выше лежащей установки применяется перерегулирование стока на ниже лежащем участке реки для тяготеющих к нему потребителей. Различная надежность водообеспечения налагает ограничения подачи воды менее ответственным потребителям при снижении ее запасов в водоеме до известного лимита.

При проектировании учитываются все перечисленные, подчас противоречивые требования водопотребителей и на основе технико-экономического сравнения вариантов выбирается решение, наиболее целесообразное для народного хозяйства.

Комплексному использованию водных ресурсов посвящены работы [24, 48, 64, 119 и др.].

§ 4. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ И ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Естественный речной сток, используемый различными водопотребителями, как известно, подвержен колебаниям. С помощью водохранилищ эти колебания сглаживаются и тем полнее, чем больше емкость водохранилища по отношению ко всему объему стока в средний год. К этому объему должен стремиться полностью зарегулированный сток, т. е. одинаковая по годам отдача водохранилища. Однако даже при достаточно больших емкостях водохранилищ не удается достичь полного равенства всех годовых объемов стока (при любом внутригодовом режиме регулирования). В зарегулированном стоке, хотя и значительно реже, чем в естественных условиях, происходят отклонения от необходимого режима, нарушения его. Число таких нарушений уменьшается по мере увеличения емкости водохранилища. Соответственно этому изменяется стоимость гидротехнических мероприятий, так как увеличивается высота и объем плотины, затопление земель и т. п.

При очень больших затратах на строительство весьма крупных водохранилищ можно приблизиться к полному выравниванию годовых объемов стока за многолетие. Но экономически такие мероприятия не оправдываются.

В связи с изложенным принимается некоторое оптимальное соотношение между надежностью водообеспечения и технико-экономическими показателями по всему комплексу мероприятий, связанных с устройством водохранилища. Все водохозяйственные установки проектируются в расчете на определенную, заранее

установленную степень надежности (гарантии) их работы по заданному режиму регулирования стока.

В случаях когда рассматривается емкость для повышения минимального стока реки, нарушение принятого режима означает, что водопотребитель получил не весь гарантированный объем или расход воды. Такие нарушения гарантированного режима называются перебоями. Когда речь идет о величине максимального расхода, принятого для расчета пропускной способности водосброса, нарушением режима будет превышение расчетного расхода, если оно произойдет.

В современной водохозяйственной практике надежность работы установки с соблюдением гарантированного режима определяется обеспеченностью в процентах или в долях единицы. Встречаются три разновидности этого понятия, отражающие средние многолетние значения:

а) годового объема доставленной потребителю воды по сравнению с гарантированным объемом (обеспеченность по объему отдачи или водопотребления);

б) общей длительности бесперебойных отрезков времени в течение рассматриваемого многолетнего периода по сравнению с общей его длительностью (обеспеченность по времени);

в) количества целых лет без перебоев по сравнению с общим числом лет за рассматриваемый многолетний период или вообще за любое многолетие (обеспеченность по числу бесперебойных лет).

Первые два представления обеспеченности не имеют преимуществ по сравнению с третьим, но довольно затрудняют водохозяйственный расчет. Такое выражение обеспеченности требует наличия длительного стокового ряда, а при регулировании стока обеспеченность определяется лишь в конце расчета характеристик водохранилища. Если в результате окажется, что обеспеченность не равна заданной, весь расчет должен быть проделан снова, а иногда даже несколько раз, до совпадения обеспеченностей заданной и полученной по расчету. Кроме того, обеспеченность по времени создает искаженное представление об условиях работы установки.

Так, если запасы водохранилища близятся к концу (в феврале) и угрожает полное отключение водопотребителя примерно на полмесяца до наступления половодья, то служба эксплуатации легко устраняет надвигающуюся катастрофу. На основе диспетчерского графика работы установки (см. гл. VII) возможность перебоя обнаруживается заблаговременно. Водопотребителю при этом в течение, например, трех месяцев (декабрь—февраль) до наступления половодья отпускается 85% отдачи вместо полного прекращения ее в течение полумесяца. Ясно, что смягчение перебоя за счет его удлинения — более приемлемый вариант, чем полное отключение водопотребителя. При оценке же надежности работы установки обеспеченностью по времени смягчающий вариант оказывается менее благоприятным, чем катастрофический.

В практике водохозяйственных расчетов гарантийность водоэнергоотдачи оценивается обеспеченностью по числу бесперебойных лет. Этот критерий отличается простотой и не имеет недостатков, свойственных другим выражениям обеспеченности, которые нередко приводятся как дополнительные характеристики для всесторонней оценки работы установки.

При обеспеченности, например, $P=97\%$ число перебойных лет равно 3%. Для 30—40-летнего ряда допустимо иметь в среднем один перебойный год. Однако принцип вероятности вовсе не констатирует пропорциональности между длительностью располагаемого ряда и числом перебойных лет, которое является только средним для нескольких таких рядов. В одном 30—40-летнем периоде может и не быть, например, ни одного перебойного года, в другом может быть три, в третьем — один и т. д. Только для весьма длительных рядов, в особенности при большом значении P, число перебойных лет можно считать достаточно устойчивой величиной. При этом допущение в приведенном примере одного перебойного года в конкретных гидрологических и водохозяйственных условиях вовсе не является обязательным.

Для определения обеспеченности применяются известные формулы (9) и (10), которые являются приближенными и потому используются лишь для ориентировочной оценки обеспеченности. Для Каховской ГЭС, например, один из основных гидроэнергетических показателей очень мало изменяется в значительном интервале обеспеченностей (85—95%) по указанным формулам, дающим разные обеспеченности для одинаковых или почти одинаковых членов ряда. Водохранилище на р. Осколе для питания канала Северский Донец—Донбасс в 50-летнем ряду наблюдений за стоком при обеспеченности водоснабжения $P=97\%$ не имеет ни одного перебоя (для менее обеспеченных водопользователей — орошения и обводнения — в том же ряду допущены перебои).

Не исключена возможность, когда при высокой степени регулирования стока и высокой обеспеченности (например, $P=97\%$) потребная емкость водохранилища оказывается больше, чем это получается по наличному 30—40-летнему ряду стока (в особенности, если такая емкость подтверждается за другие годы наблюдений по другой реке, находящейся в аналогичных физико-географических условиях). При этом надо иметь в виду, что задаваемая обеспеченность относится не к величине стока, а к водохозяйственному результату регулирования — гарантированной годовой отдаче водохранилища или гарантированному графику годовой выработки энергии.

Эти показатели зависят не только от режима стока и емкости водохранилища, но и от схемы регулирования и характера работы установки. В одном и том же ряду фактических наблюдений водохранилище, работающее для водоснабжения, может вовсе не иметь перебоя, а ГЭС, работающая на том же стоке, может иметь перебой, в особенности если с предыдущего года водохранилище оказалось незаполненным: в первом случае значение имеет только

количество отдаваемой воды, а во втором — еще и напоры. Последние могут быть изменены при назначении иного плана работы ГЭС, что отражается и на обеспеченности (к выбору обеспеченности работы ГЭС мы вернемся в § 32).

Поэтому обоснование и проверка принятой обеспеченности производится не просто по формуле (9) или (10) для результата регулирования, а с учетом конкретных гидрологических и водохозяйственных условий и с применением дополнительных обобщений. К таким обобщениям относятся:

а) анализ взаимодействия водохранилища с варьирующим стоком при высокой его зарегулированности (см. гл. V);

б) установление (на основе теории вероятностей и статистических параметров) величин стока, определяющих режим работы установки за год, межень или более короткие отрезки времени (в зависимости от задания по водопользованию) при небольшом, сезонном регулировании стока.

Иногда аналогичной обработке подвергается продукция водохозяйственной установки, например энерговыработка ГЭС или размер водоотдачи [70]. Однако такой прием контроля обеспеченности имеет меньшие возможности и допустим в основном при малом регулировании стока, так как закономерность изменения продукции водохозяйственной системы не является достаточно определенной и зависит от дополнительных, задаваемых обстоятельств (пропускная способность турбин, план работы водохранилища и т. п.).

Обеспеченность водо- или энергоотдачи по числу бесперебойных лет является основной водохозяйственной характеристикой. Она выбирается во всех случаях, когда установка выполняет многолетнее или достаточно глубокое сезонное регулирование стока. Однако и в этом случае годовой режим водо- или энергоотдачи связывается с обеспеченностью по числу бесперебойных лет, а вместе с этим приводятся хронологические графики и кривые продолжительности расходов, напоров, мощностей и уровней верхнего и нижнего бьефов.

Для установок с неглубоким регулированием стока и при отсутствии регулирования обеспеченность их водо- или энергоотдачи часто принимается по продолжительности (по времени).

Обеспеченность различных гидрологических элементов (расходов, уровней и т. п.) в естественных условиях водотока оценивается по числу бесперебойных лет, а также по времени в пределах сезона, года или многолетия.

Уровенный режим для водного транспорта на естественных и зарегулированных водотоках оценивается по многолетней кривой продолжительности уровней за навигационный период. Но при расчете водохранилища для навигационных попусков принимается обеспеченность по числу бесперебойных лет.

Рассмотренные разновидности обеспеченности при одинаковом их значении не эквивалентны по существу. Так, обеспеченность водоснабжения в 95% бесперебойных лет вовсе не равноценна

95%-ной бесперебойности по времени или по объему отпущенной воды. В каждом из перебойных лет (общее число их в данном случае равно 5%) нормальное снабжение будет нарушено лишь в пределах части года, да и в это время оно не прекратится, а только понизится. Следовательно, числовое значение обеспеченности бесперебойного водоснабжения, оцениваемое по времени, а тем более по объему водоотдачи, значительно выше обеспеченности по числу бесперебойных лет.

В принципе значение обеспеченности водо- и энергоотдачи должно обосновываться экономическими соображениями. В основе этого норматива лежит сопоставление ущербов, вызываемых ограничениями в доставке потребителю воды, с затратами, необходимыми для сокращения ограничений. Однако такое обоснование связано с большими методическими и техническими трудностями. Основное затруднение заключается в неопределенности ряда факторов, которые надо учитывать при оценке народнохозяйственного ущерба, вызываемого вынужденными ограничениями водоэнергоснабжения. Такая неопределенность возникает при оценке возможностей экономии воды, при установлении очередности отключения потребителей, при учете экономических последствий сокращения их продукции и т. п. Кроме того, имеются важные водопотребители, которым свойственны следующие особенности.

1. Норма их водопотребления не может быть экономически обоснована. Коммунальное водоснабжение, например, принципиально не допускает экономического подхода к выбору нормы и ее обеспеченности. Ущерб при ограничении водоотдачи этому потребителю сводится не к сокращению производства, а к неудобствам или лишениям, которые испытывает население.

2. Оптимальная норма расхода воды и последствия от ее сокращения неизвестны (рыбное хозяйство с промыслом проходных и полупроходных рыб в низовьях Днепра, Дона, Волги, Куры, Урала и других рек).

3. Норма водопотребления непостоянна и неопределенна, так как неустойчиво связана с показателями качества воды, не имеющими четких значений и возникающими иногда стихийно («цветение» воды, прозрачность ее, вкус, запах и так называемые «допустимые» концентрации растворенных веществ, не поддающиеся экономическому обоснованию). Поэтому затраты, например, на сооружение водохранилища для попусков как средства улучшения качества воды ниже лежащего участка реки, используемого для водоснабжения, благоустройства, спортивно-оздоровительных и других целей, не могут быть противопоставлены сокращению какого-то экономического ущерба, бывшего до улучшения качества воды на этом участке.

В подобных случаях вопрос об улучшении качества воды за счет попусков или других мероприятий может решаться лишь в зависимости от местных условий (см. § 3) и на основе наблюдений за водотоком при разных расходах воды и режимах метеорологических элементов. Такой вопрос может иметь технико-экономическое

обоснование лишь в смысле выявления общей целесообразности и приемлемости тех или иных мероприятий и необходимых для них затрат в конкретных условиях.

То же относится и к указанным в пп. 1 и 2 водопотребителям, для которых решающее значение имеет величина расхода речной воды, а регламентация его в зависимости от качества воды в наличных природных условиях не возникает.

Особенности водообеспечения поливного земледелия состоят в следующем.

1. Орошение — самый крупный водопотребитель в стране. В большинстве засушливых районов не хватает имеющихся водных ресурсов для орошения всех земель, испытывающих недостаток во влаге.

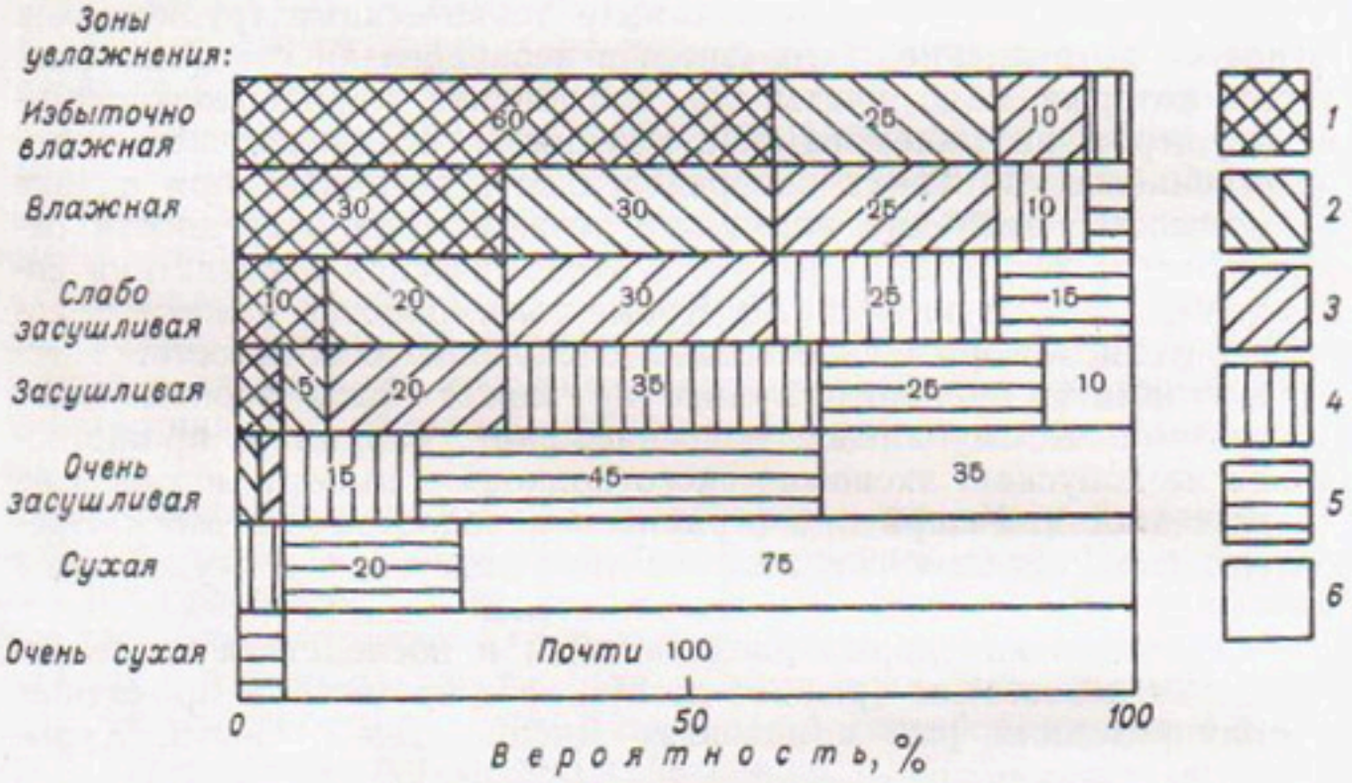


Рис. 12. Вероятность (%) влажных, засушливых и сухих лет по зонам увлажнения.

Годы: *1* — избыточно влажные, *2* — влажные, *3* — слабозасушливые, *4* — засушливые, *5* — очень засушливые, *6* — сухие.

2. Естественное увлажнение с севера на юг падает постепенно. Д. Т. Зузик [41] выделяет семь характерных зон, различных по степени увлажнения (рис. 11). В каждой из них имеются засушливые и влажные годы, различающиеся частотой появления. Так, в средней (из семи) засушливой зоне число сухих лет составляет 10%, очень засушливых 25%, засушливых 35%. Даже в избыточно влажной зоне бывают годы засушливые (5%) и слабозасушливые (10%). Сухая и очень сухая зоны состоят почти целиком из сухих и очень засушливых лет (рис. 12).

3. Во всех зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения орошение выполняет двойную роль — пополнение влаги и регулирование влаги в почве. Первая роль относится к увеличению приходной части водного баланса и оценивается прямым эффектом

орошения по соотношению между объемом затраченной воды и дополнительным урожаем, т. е. по коэффициенту водопотребления. Вторая роль по своей значимости очень часто превосходит прямой эффект от орошения. Засушливый период, продолжающийся в мае—июне всего лишь две-три декады, бывает пагубным для ряда культур, хотя в целом за период вегетации осадков выпадает достаточно. При этом даже небольшой регулирующий полив (100—200 м³/га) может спасти урожай и предотвратить его снижение. Эффект такого полива обусловливается, конечно, не тем, что это на 3—5% увеличивает общее поступление воды в почву. Благодаря такому поливу обеспечивается эффективное использование за вегетацию 3000—4000 м³/га естественных осадков, выпадающих нередко с перерывами, пагубными для урожая.

Изложенное в пп. 1, 2 и 3 позволяет сделать определенные выводы о водообеспечении поливного земледелия.

В зонах недостаточного и неустойчивого увлажнения средние оросительные нормы, как известно, различны: в сухие годы 5000 м³/га и более, в засушливые 2000—4000 м³/га и во влажные 500—1000 м³/га и менее. В общем случае дело обстоит так, что при недостаточной подаче воды на орошение приходится прибегать (в зависимости от местных условий) или к уменьшению поливных норм, или к сокращению поливных площадей. В обоих случаях перебои приводят к уменьшению продукции сельского хозяйства.

Казалось бы, что для обеспечения постоянных и устойчивых урожаев ирригационную систему следует рассчитывать на оросительную норму самого сухого года, например на 5000 м³/га. Но такие годы в засушливой зоне составляют только 10% всех лет (рис. 12), и пропускная способность системы в этом случае будет полностью использоваться здесь только 1 раз в 10 лет; в остальное время она будет работать неполной мощностью, а в используемом для орошения водохранилище значительная часть притока пойдет на сброс. (При заборе воды из реки сброса не происходит, но снижение водозабора — это такая же потеря при орошении, как и сброс.)

Если расчет для той же зоны произвести по средней норме, например 2500 м³/га, то система будет использоваться примерно на 75—80%, но в очень засушливые и сухие годы, т. е. в 35% лет нельзя будет получить заданного высокого урожая. Возможно и промежуточное наиболее распространенное решение, при котором часть лет (10—20%) обеспечивается пониженной, а все остальные годы — полной оросительной нормой. При такой системе водообеспечения орошаемая площадь увеличивается примерно вдвое по сравнению с расчетом по норме сухого года, а общая прибавка продукции возрастает на 75—80% [41].

Вопрос о расчетной пропускной способности оросительной системы, величине поливного массива и объеме водохранилища для него в каждом конкретном случае решается в зависимости от водообеспеченности района, состава культур и экономических показателей орошаемого земледелия. При этом всегда необходимо

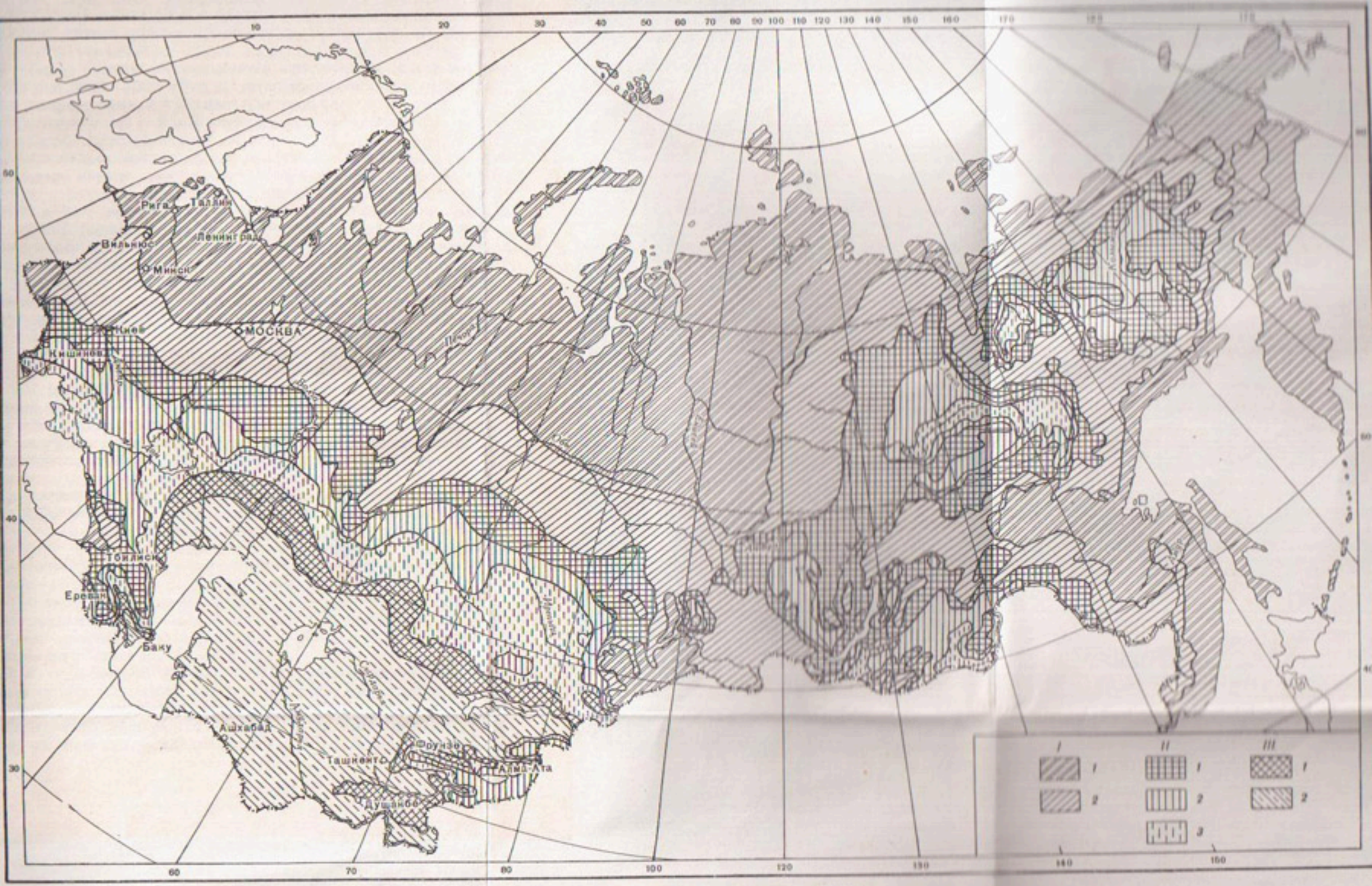


Рис. 11. Зоны увлажнения на территории СССР.

I — влажные зоны: *1* — избыточно влажная, > 1,33, *2* — влажная, 1,33—1,00; *II* — засушливые зоны: *1* — слабозасушливая, 1,00—0,77, *2* — засушливая, 0,77—0,55, *3* — очень засушливая, 0,55—0,33; *III* — сухие зоны: *1* — сухая, 0,33—0,22; *2* — очень сухая, < 0,22; цифры — показатель увлажнения: $\frac{\text{осадки в мм}}{\text{испарение в мм}}$

Вклейка. Зак. 574

добиваться наиболее производительного использования оросительной системы.

В годы не очень сухие следует расширять оросительную площадь, переходя к подвижной (выборочной) системе орошения на большей площади, чем при стабильном орошении в сравнительно редко появляющемся расчетном году. Это дает значительный экономический эффект не в отдельном году, а в большинстве лет, когда система и насосная станция были бы полунагружены и воду из водохранилища пришлось бы сбрасывать (или не забирать из реки), хотя вблизи имеются площади с культурами, требующими поливов.

В отделении совхоза «Маяк» (УССР) отмечено, что при использовании заданного лимита воды из Ингулецкой системы при стабильном орошении можно поливать 400 га из общей площади 1200 га, а при подвижном орошении выборочные поливы можно производить на всех 1200 га в зависимости от погодных и хозяйственных условий. Полив преимущественно более ценных культур (сахарной свеклы, овощных), садов и площадей, наиболее нуждающихся в дополнительном увлажнении в каждый данный период обеспечивает высокую эффективность орошаемого земледелия. А наличие площади для подвижного орошения, в 3 раза большей по сравнению со стабильной (коэффициент подвижности 3, в Астраханской области он близок к 10), позволяет широко применять весьма эффективные и дешевые влагозарядковые поливы под зерновые и другие культуры, а также орошение пожнивных посевов [41]. Это дает возможность удлинить на 2—3 месяца поливной период и полнее использовать сооружения, производственную мощность системы и водные ресурсы источника.

Наряду с этим эффективность использования водных ресурсов следует повысить путем снижения потерь воды на фильтрацию, недопущения сбросов ее из системы, внедрения рациональной техники поливов и т. п. Многообразие приведенных условий отражается на величине обеспеченности орошения водой. Поэтому обеспеченность в этой отрасли принимается в довольно широких пределах — 75—95% (по числу бесперебойных лет), причем для хлопка и садово-огородного хозяйства она должна быть ближе к верхнему пределу.

Промышленные предприятия отличаются постоянством расхода потребляемой воды и количества выпускаемой продукции, а потому в ряде случаев представляется возможным установить ущерб для производства, приходящийся на 1 м³ недоданной воды. Именно такая оценка ущерба необходима для экономического обоснования обеспеченности промышленного водоснабжения. Однако в требуемой полноте этот вопрос пока еще мало разработан [61].

Почти все отрасли производства допускают без существенного сокращения продукции более или менее значительную экономию воды. Для металлургического комбината, по литературным данным, при прямоточной системе водоснабжения уменьшение подачи воды до 15—20% нормы не вызывает еще снижения производи-

тельности, а при оборотном водоснабжении уменьшение подачи свежей воды (подпитки) до 5—10% нормы ухудшает условия работы предприятия, но не сказывается на производительности его основных цехов. Дальнейшее сокращение гарантированного расхода воды снижает производительность и приводит к остановке агрегатов или целых производств. Примерно также обстоит дело при водоснабжении ГРЭС и других крупных водопотребителей.

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

Расчетная обеспеченность работы ГЭС, согласно исследованиям [52], зависит в основном от плотности графика нагрузки смешанной энергосистемы, удельного веса ГЭС в ее составе, степени регулирования стока водохранилищем. Чем плотнее график нагрузки, чем выше удельный вес ГЭС в системе и степень регулирования стока, тем больше должна быть обеспеченность работы ГЭС.

При обычном типе промышленной нагрузки, небольшом (до 20%) удельном весе ГЭС в составе смешанной энергосистемы и невысоких (сезонных) степенях регулирования стока обеспеченность, определяющая выбор мощности ГЭС, равна примерно 70—80% (по числу бесперебойных лет). При повышении удельного веса ГЭС в системе наряду с многолетним регулированием стока повышается и обеспеченность до 95% и более.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61] приводят результаты некоторых работ, посвященных экономической оценке перебоев. Так, например, ущербы от ограничения водопотребления на 1 м³, т. е. удельные ущербы, например, для металлургического комбината ориентировочно составляют 2—3 руб/м³, для сельскохозяйственного орошения земель юго-востока Европейской территории СССР 0,3—0,5 руб/м³, для ГРЭС недодача свежей воды вызывает ущерб в размере 10 руб/м³, если ущерб от уменьшения доставки энергии на 1 кВт·ч оценить в 10 коп. и считать, что недостаток 1 м³ свежей воды приводит к снижению выработки энергии на 100 кВт·ч. (В то же время для ГЭС при напоре 20 м ущерб составляет 0,04 кВт·ч, или 0,4 коп/м³.) В работе [25] показано, что для приведенных условий удовлетворение названных водопотребителей экономически оправдывает следующую обеспеченность отдачи:

При ущербах	0,3	руб/м³	воды (ирригация)	$P=80\div94\%$
„ „	2,0	„	„ (промпредприятия)	$P=96\div99\%$
„ „	10,0	„	„ (ГРЭС)	$P\geqslant99\%$

Здесь нижние значения P относятся к варианту с дорогим водохранилищем (с повышенной строительной стоимостью, приходящейся на 1 м³ емкости), верхние — к варианту с дешевым водоемом.

Интересны также следующие энергетические данные. Если на электростанциях различного типа в течение некоторого времени (например, 5—7 месяцев) в связи с дефицитом воды, т. е.

перебоем по водоотдаче, не хватает на покрытие безвозвратного водопотребления, допустим, 0,5 м³/с, то при этом происходит прекращение выдачи следующих мощностей за тот же период времени:

ГЭС с напором 20 м при потере расхода 0,5 м³/с . . .	80 кВт
ГРЭС с речным охлаждением при снижении расхода свежей воды на 0,5 м³/с против расчетного минимального	18 000 кВт
Водохранилищная ГРЭС при прекращении безвозвратного отъема воды в размере 0,5 м³/с (дефицит воды, т. е. перебой в отдаче водохранилища)	800 000 кВт

Здесь для ГРЭС приведен порядок величин ущерба из-за недодачи воды. Они могут колебаться в зависимости от сезона года, типа оборудования и т. п. Но при этом они показывают, насколько ценна вода для тепловых электростанций, в особенности для водохранилищных, которые требуют резервирования возможностей повышения водообеспеченности даже до $P>99\%$, хотя существующими ведомственными нормами обеспеченность регулирования стока для водохранилищных ГРЭС принимается равной $P=97\%$ (по числу бесперебойных лет). Эти возможности имеются по водохранилищам, выполняющим для ГРЭС обе функции — регулирование стока и охлаждение воды (§ 29, 30).

Отметим также, что одинаковое повышение обеспеченности водоснабжения при низких степенях регулирования достигается меньшим приращением емкости водохранилища, чем при высоких. Иначе говоря, обеспеченность работы установки в принципе зависит также и от степени регулирования стока, что будет освещено в гл. VI.

В приведенных примерах показаны различное отношение ряда отраслей народного хозяйства к перебоям, неодинаковая роль воды в каждой отрасли при разных природных и хозяйственных ситуациях, сложные сочетания обстоятельств при обслуживании установкой нескольких участников водохозяйственного комплекса.

Освещенные в литературе попытки экономического обоснования обеспеченности водопотребления относятся лишь к случаям, для которых ущербы от недодачи воды принимаются как известные. Однако и в этих случаях трудности решения позволяют пока находить лишь некоторые пределы обеспеченностей, а в основном — тенденцию в их изменении при разных соотношениях участников водохозяйственного комплекса или при изменении их характеристик.

Ввиду трудности, а в ряде случаев и неприемлемости экономического обоснования расчетной обеспеченности для установок, снабжающих разные категории потребителей водой и энергией, в СССР нет общегосударственных норм по обеспеченности водо- и энергопотребления и водопользования. Она принимается с использованием результатов упомянутых исследований, с учетом важности водохозяйственных мероприятий в местных конкретных условиях и на основе практических данных многолетнего опыта проектирования и эксплуатации установок.

Еще в 1925—1930 гг. мощность источника для заданной водопотребности выбиралась из расчета на самый низкий сток по гидрометрическим данным. При этом как бы предполагалось, что достигается практически полная бесперебойность водоснабжения, по крайней мере, на срок, равный периоду гидрометрических наблюдений. Такое упрощенное представление о вероятности бесперебойной работы водохозяйственной установки и вошло в практику в качестве норматива.

Гидрометрические данные обычно имелись за 20—30 лет. Сток наиболее маловодного отрезка такого периода соответствует примерно 95—97%-ной обеспеченности, т. е. более маловодные сезоны, годы и сочетания их наблюдаются в среднем 3—5 раз в столетие. Эта обеспеченность и стала нормативом для ответственных водо- и энергопотребителей, снабжение которых должно поддерживаться практически бесперебойно. Для отраслей народного хозяйства, сравнительно безболезненно допускающих некоторое ограничение в подаче воды, безусловное удовлетворение их полной водопотребности заведомо нецелесообразно. В подобных случаях стали ориентироваться на некоторые сокращения водоотдачи, ограничивая их повторяемость более или менее условно выбранными нормативами: 1 раз в 5—10 лет. Такой частоте отклонений от нормального режима соответствует обеспеченность 80—90%.

Сокращение отдачи за пределами расчетной обеспеченности обычно принимается равным 15—25%, а водопотребление, равное 75—85% нормы, обеспечивается с высокой степенью надежности, т. е. в течение 95—97% лет, в зависимости от значения C_v годового стока.

Соответственно этому вводится двойной норматив обеспеченности — для полной нормы и урезанного водопотребления.

К категории потребителей, требующих практически бесперебойного водообеспечения ($P=95\div99\%$), обычно относятся коммунальное хозяйство, промышленность, тепловые электростанции, крупные ГЭС, являющиеся основным или преобладающим источником энергии в системе, обслуживающей значительные промышленные предприятия.

К потребителям, допускающим более или менее частые отклонения от нормы, относятся орошение, водный транспорт (при поддержании глубин посредством попусков из водохранилищ), малые и средние ГЭС, а также крупные ГЭС мощной энергосистемы, состоящей в основном из тепловых электростанций.

Нормы обеспеченности, обычно принимаемые при проектировании, находятся в следующих пределах, указываемых ниже везде (при отсутствии оговорок) по числу бесперебойных лет, в долях единицы или в процентах:

Водоснабжение:	P%
объекты специального назначения	до 99
крупные промышленные центры, отдельные значительные предприятия, мощные тепловые электростанции	97 и более

небольшие города и поселки, мелкая промышленность	95
ГЭС при следующих потребителях энергии:	
крупная промышленность и города (в зависимости от веса мощности ГЭС в энергосистеме) . . .	85—95
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 и вида орошаемых культур	75—95
Рыбное хозяйство:	
водообеспечение рыбных прудов	75—85
то же при водообеспеченности рыбоводства в реках (в зависимости от рыбопромыслового значения реки)	75—95
Водный транспорт:	
при поддержании глубин посредством попусков (в зависимости от значения водной магистрали)	80—90
гарантированные глубины в естественных и измененных условиях рек, обеспеченные по времени, т. е. по используемой продолжительности периода навигации (за многолетие)	до 99

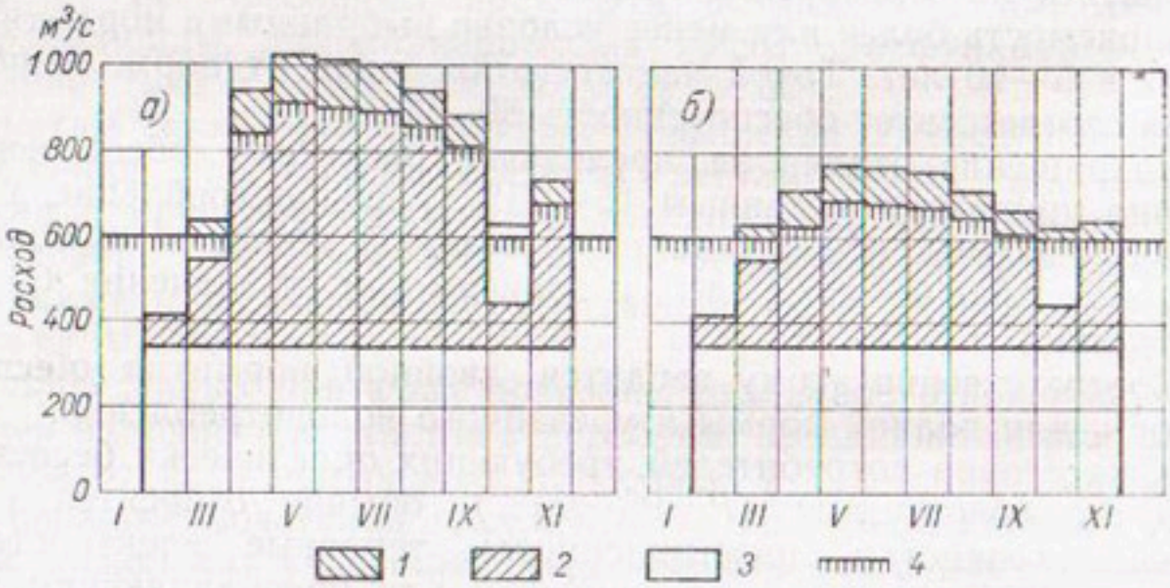


Рис. 13. Комплексное обслуживание отраслей народного хозяйства водохозяйственной установкой.

а — нормальная отдача воды (P=80%), *б* — пониженная отдача воды (P=95%); *1* — орошение из верхнего бьефа ГЭС, *2* — орошение из нижнего бьефа, *3* — потребность водного транспорта ниже отвода воды на орошение, *4* — расходы, используемые ГЭС.

При водохозяйственных расчетах для потребителей, имеющих различную обеспеченность, с целью упрощения следует объединять их в две основные группы, тем более что для каждого из них допускается обеспеченность в некоторых пределах.

Если потребителей необходимо снабжать водой, например, с обеспеченностями 75, 80, 85 и 97%, то для расчета принимаются две группы: 80 и 97%. При этом с пониженной обеспеченностью (80%) удовлетворяются все потребители. Количество воды, подаваемой с повышенной обеспеченностью (97%), равно нормальной потребности второй группы плюс урезанная на 20—25% потребность первой группы.

После выявления водопотребности различных отраслей народного хозяйства по месяцам года и разделения ее на две основные группы по обеспеченности строится суммарный график необходимых расходов воды (или дефицитов ее), привязанный к конкретному створу источника. При этом учитываются также и потери по трассе к потребителю, а также изменения водного баланса между водопотребителями в зависимости от расположения их вдоль реки, с учетом условий их работы (§ 3).

Таким образом, суммарный обеспеченный график водопотребления должен отражать установленные в проекте соотношения между отдельными потребителями. Это и показано на примере распределения воды между разными участниками водного хозяйства при двух градациях обеспеченности (рис. 13).

Обеспеченные суммарные графики водопотребления и водопользования согласовываются с участниками комплекса и являются исходной основой для водохозяйственных расчетов и регулирования стока.

Обеспеченности отдачи гидроустановок посвящены работы [25, 40, 52, 135 и др.].

Глава III

ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ УСТАНОВКИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОХРАНИЛИЩ

§ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Распределение по времени воды, поступающей к водохозяйственной установке, обычно не совпадает с требованиями потребителя. В многоводные периоды река несет больше воды, чем нужно, и избытки ее не используются. При низком стоке, наоборот, иногда необходимо ограничивать водопотребление. В большинстве случаев запросы потребителей удается приспособить к колебаниям стока, используя избытки воды многоводных периодов при помощи водохозяйственной установки. Режим ее работы представляет собой результат согласования требований потребителя воды (или энергии) с ресурсами источника.

В целом задача сводится к оценке получаемого народнохозяйственного эффекта, к выяснению необходимых размеров сооружений и условий их эксплуатации. Поэтому проектирование такой установки должно начинаться с исследования ее режима, от которого зависят размеры и конструктивные особенности установки. При регулировании стока можно планомерно перераспределять сток реки. При этом в задачу водохозяйственного расчета входит не только выявление особенностей работы установки, но и выбор наиболее целесообразного режима ее эксплуатации, т. е. правил наполнения и сработки водохранилища.

При проектировании обычно возникают следующие водохозяйственные задачи:

а) выбор наиболее целесообразного сочетания размеров водохозяйственной установки и размеров ее водо- или энергоотдачи. Так ставится задача для новых предприятий, размещаемых в засушливом районе и нуждающихся в большом количестве воды. Так же обстоит дело с проектированием ГЭС для совместной работы и ГРЭС. При этом энергосистема может обеспечить потребителей при различных комбинациях мощности ГЭС и ГРЭС;

б) выбор размеров гидротехнических сооружений на заданном источнике и при заданном водо-энергопотреблении. Примером может служить задача водоснабжения населенного пункта или промышленного предприятия, нуждающихся для нормальной работы в определенных количествах воды;

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

Решение перечисленных задач при известном режиме источника сводится к выявлению водохозяйственного эффекта по вариантам подпора (размеров сооружений) и правил эксплуатации. Такие решения и составляют содержание водохозяйственного расчета (см. § 1).

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

Для определения размеров и условий работы водосливов и водоспусков требуется исследование сбрасываемых расходов воды. Нередко регулирование сброса высоких вод является одной из основных задач установки.

От уровней верхнего и нижнего бьефов зависят условия отвода воды из водохранилища в каналы и водоприемники. Ими же определяется высота подачи воды насосами к потребителям и напор на турбинах ГЭС. С режимом уровней связан расчет устойчивости плотин, гидравлический расчет водосливов и водоспусков и т. д. Кривые подпора уровней от плотины и выше по реке характеризуют размеры затопления и подтопления прилегающих к водохранилищу земель.

Итак, основными элементами водохозяйственного режима, необходимыми для оценки работы установки, являются: расходы воды, доставляемой потребителям (с разделением между ними); мощности ГЭС; сбросные расходы; уровни верхнего бьефа (у плотины, у водоприемников и в характерных пунктах по длине водохранилища; уровни нижнего бьефа (у плотины, в пунктах выхода судоходной и силовой деривации и т. д.); напоры, используемые ГЭС.

Обычно расходы воды, мощности, уровни обоих бьефов (у плотины) и напоры изображаются в виде хронологических графиков колебания этих величин и кривых продолжительности их за расчетный многолетний период стока. Эти последние кривые показывают, например, сколько времени потребитель получал полную или неполную норму воды или энергии. Построение их излагается в курсах гидрологии. Абсцисса каждой точки графика показывает процент времени, в течение которого данная характеристика превышала величину, изображаемую соответствующей ординатой. Разность абсцисс двух точек кривой дает процент времени, когда характеристика колебалась в пределах ординат, относящихся к этим абсциссам.

Если условия работы установки мало изменяются по временам года, упомянутые графики могут строиться для всего года. В противном случае каждому сезону отвечает свой график, но при этом по оси абсцисс за 100% времени принимается не год, как

в первом случае, а лишь часть его. При проектировании принимаются несколько разновидностей графиков продолжительности элементов режима.

Обобщенный график продолжительности служит для изображения распределения расходов воды и других элементов режима за весь многолетний период, принятый для водохозяйственных расчетов. Абсциссы графика, отвечающие каждому значению ординаты, представляют собой средние арифметические из абсцисс для той же ординаты по графикам продолжительности отдельных лет (или сезонов для посезонных графиков). Такие построения — это основные характеристики, используемые для вероятностной оценки режима работы установки в условиях будущей ее эксплуатации.

Средний график продолжительности применяется иногда для характеристики режима в средних гидрологических условиях. Построение этого графика производится путем вычисления средних арифметических из ординат при одинаковых абсциссах по кривым отдельных лет.

Такой график принципиально отличается от применявшегося иногда гидрографа «среднего фиктивного года», который строился путем осреднения расходов воды в одни и те же даты за ряд лет. При таком построении не учитывались сдвиги по годам однородных фаз стока (ранние и поздние половодья и т. д.); паводки, наблюдавшиеся лишь в отдельные годы, сглаживались, а гидрограф приобретал нереальные плавные очертания, искажающие условия использования стока.

Графики продолжительности за характерные годы применяются для отличающихся от средних по стоку лет: многоводных, маловодных и т. п. и строятся по характерным расчетным гидрографам.

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

Для исследования экстремальных элементов режима (наибольших и наименьших), имеющих значение при выборе размеров сооружений и оборудования, по формуле (9) строятся графики обеспеченности этих элементов. Каждая ордината графика изображает величину, относящуюся к какому-либо году, а ее абсцисса — есть обеспеченность этой величины, выраженная в долях от общего числа лет, принимаемого за единицу (или за 100). При этом абсцисса означает не долю времени, а лишь частоту повторения исследуемой величины (например, расхода) в расчетном периоде.

Кривые продолжительности позволяют судить о повторяемости отдельных элементов режима, но не дают представления о всех особенностях режима одновременно, о связи между колебаниями различных элементов и т. д. Этот недостаток восполняется хронологическими графиками хода водохозяйственных элементов за весь

исследуемый ряд лет, принимаемый в качестве прототипа будущего режима стока и работы установки.

Аналогичные построения для анализа работы действующей установки за некоторый истекший период выполняются путем обработки хронологических таблиц и графиков по отчетным данным. При проектировании же такие графики строятся по результатам водохозяйственного расчета, основанного непосредственно на многолетних данных о стоке. Однако этот метод расчета, наглядно освещая ход всех элементов режима за многолетие и позволяя исследовать водохозяйственные схемы любой сложности, как отмечено выше, имеет существенные недостатки.

Поэтому наряду с таким эмпирическим методом расчета по многолетним рядам стока применяется также вероятностный метод, основанный на обобщенных параметрах стока (см. § 2). Оба метода, дополняя друг друга, дают возможность надежно обосновать размеры, производительность и режим работы установки. Сущность этих методов изложена в главах IV и V.

§ 6. ВОДОХРАНИЛИЩА И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Типы водохранилищ

Под водохранилищем понимается всякий достаточно крупный водоем, в котором временно накапливается вода для последующего ее использования. Кроме естественных водоемов, существует несколько видов искусственных водохранилищ.

1. Небольшие металлические и железобетонные резервуары, устраиваемые над землей (водонапорные башни) или под ее поверхностью в достаточно возвышенных точках местности (подземные резервуары). Такие сооружения — это обычные элементы систем водоснабжения населенных пунктов, предприятий, железнодорожных станций. Служат они для выравнивания внутрисуточной неравномерности подачи воды из источника при значительных колебаниях водопотребности. Расчет их объема подобен расчету бассейнов суточного регулирования мощности ГЭС (§ 33) и приводится в курсах водоснабжения.

2. Водоемы, устраиваемые в выемке (копани, часто с родниковым питанием) или полувыемке, а также путем обвалования горизонтальной или слегка наклонной местности. Служат они для местного хозяйственного водопользования, в качестве бассейна суточного регулирования деривационной ГЭС, для лиманного орошения весенним стоком собственной и ниже расположенных площадок.

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

4. Водохранилища, создаваемые в речных долинах при помощи плотин. Эти водоемы имеют наибольшее распространение. С ними в основном и связано содержание книги.

Емкостные и гидравлические характеристики водохранилища

Чаша водохранилища характеризуется конфигурацией, величинами площадей, объемов, глубин и других показателей при разных отметках уровня воды. Исходной для определения всех этих

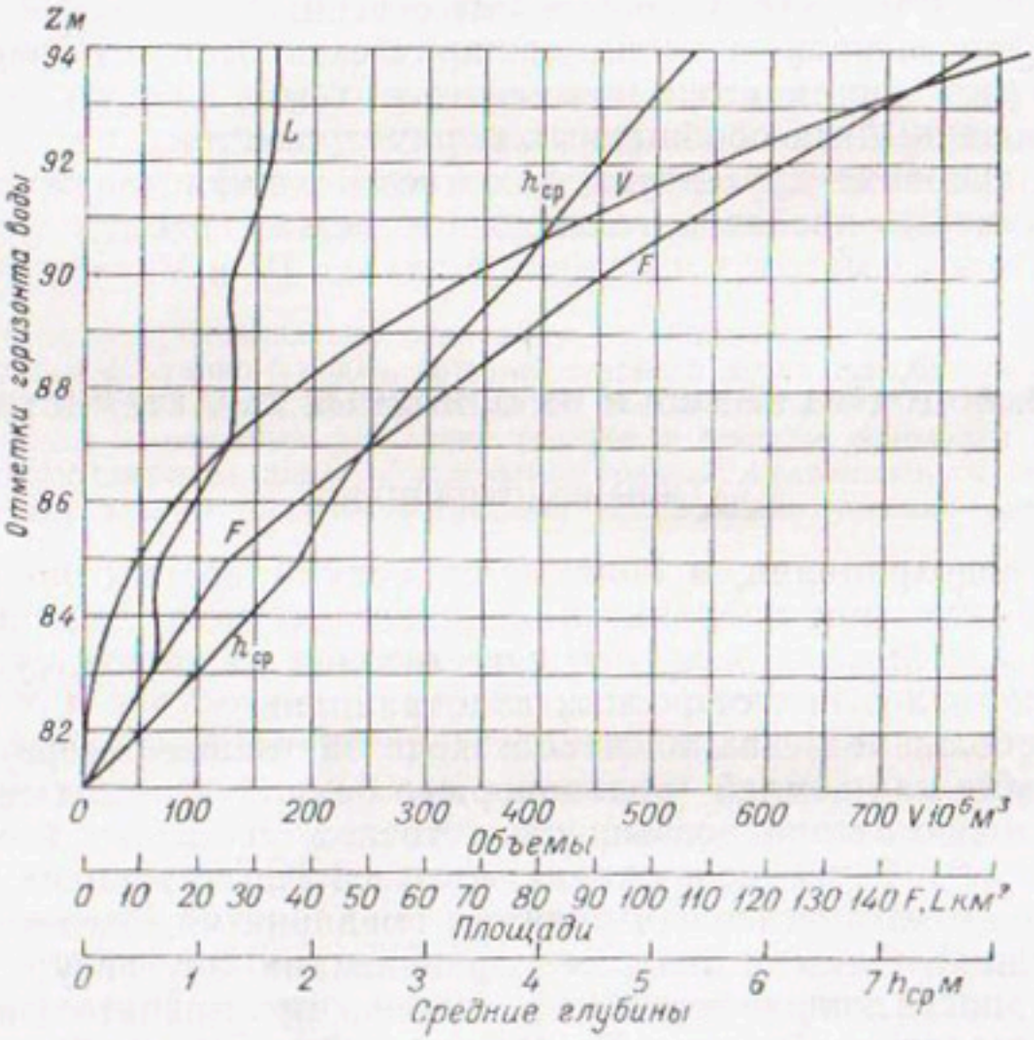


Рис. 14. Кривые морфометрических характеристик водохранилища.

показателей является зависимость площади водохранилища от отметки уровня воды в нем $F=\varphi(Z)$.

Площадь определяется планиметрированием горизонталей по топографическим картам масштабов 1 : 10 000, 1 : 25 000 и 1 : 50 000 с сечением рельефа соответственно через 2, 5 и 10 м. (Обычно на этих картах имеются и полугоризонтали соответственно через 1, 2,5 и 5 м, которые также можно использовать.)

С повышением уровня водоема площадь зеркала увеличивается и зависимость $F=\varphi(Z)$ представляет собой возрастающую неправильную линию с изломами в точках найденных площадей (рис. 14).

Элементарный объем водохранилища равен $dV=FdZ$, а полный объем равен площади между осью ординат и кривой $F=\varphi(Z)$, т. е.

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

где Z_0 и Z — отметки дна и уровня воды.

Элементарные объемы между отметками уровней находятся по соотношению

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

или

$$\Delta V=\frac{F_i+F_{i+1}+\sqrt{F_iF_{i+1}}}{3}\Delta h,$$

где Δh — разность отметок уровня воды Z_{i+1} и Z_i.

Объем водохранилища V до какой-нибудь отметки находится суммированием элементарных объемов от самой нижней точки чаши до данной отметки (табл. 13).

Таблица 13

Координаты кривых морфометрических характеристик водохранилища

Отметка Z м	Площадь, км²		Объем, млн. м³		Средняя глубина $h_{ср}$ м	Площадь литорали	
	F	$\frac{F_i+F_{i+1}}{2}$	ΔV	V		L тыс. м²	% от площади зеркала
81,0	0,0			0,0	0,0	—	—
		3	3				
82,0	6,0			3,0	0,5	6,0	100
		9	9				
83,0	12,0			12,0	1,0	12,0	100
		15,2	15,2				
84,0	18,5			27,2	1,46	12,5	67,5
		22	22				
85,0	25,5			49,2	1,92	13,5	53,0

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

Построенная в предположении горизонтальности уровня воды в водоеме, что свойственно поверхности гидростатического равновесия неподвижной жидкости, эта кривая называется *статической*.

При пропуске больших расходов половодья и паводков горизонтальность поверхности водоема исчезает. Объем водохранилища зависит тогда от очертания кривой подпора, т. е. от величины поступающего расхода воды Q, гидравлических свойств всего подпорного бьефа и уровня воды у плотины Z. Кривая объемов $V=f(Q, Z)$ называется *динамической* (см. § 45).

Отклонение уровня водоема от горизонтального вызывается передко действием сильного и продолжительного ветра на водную поверхность. При этом образуется перекос поверхности с понижением уровня у подветренного берега (сгон) и повышением у наветренного (нагон).

Эти явления освещены в литературе [44] и должны учитываться при назначении высоты подпорных сооружений и т. п.

Статическая кривая объемов имеет вид плавной кривой параболического типа. Если зависимость $F=\varphi(Z)$ изображается прямой, то кривая $V=f(Z)$ будет строго квадратической параболой, а при постоянной площади зеркала (водоем с вертикальными стенками) кривая объемов переходит в прямую.

Если имеется кривая объемов и известна площадь дна водоема у плотины (обычно она начинается равной нулю), то кривую $F=\varphi(Z)$ можно восстановить обратным пересчетом, исходя из объемов.

Для русловых подпорных бьефов кривая $V=f(Z)$ строится по участкам длиной l_i, на которые русло разбивается поперечниками от плотины до места выклинивания подпора. При этом находят площадки f_i между соответственными смежными отметками на поперечниках по концам участка и часть его объема $\Delta V=\frac{1}{2}(f_i+f_{i+1})l_i$. Остальные построения для кривых объемов каждого участка аналогичны вышеизложенным. Объемы для одинаковых отметок по этим кривым суммируются, и по ним строится общая кривая $V=f(Z)$ для всех участков.

Построение кривых русловой емкости потока (без подпора) см. в § 33.

Важными характеристиками водохранилища являются также средняя глубина $h_{ср}=V:F$ и удельная площадь зеркала (приходящаяся на единицу объема) $f_{уд}=F:V=1:h_{ср}$ м^2/м^3.

Площадь мелководья (литорали L) глубиной $h\leqslant 1{,}5\div 2{,}0$ м при заданной отметке горизонта воды Z определяется, пользуясь кривой $F=\varphi(Z)$, как разность площадей зеркала при данной отметке и при отметке на 1,5—2,0 м ниже. Величины средней глубины водоема и площади мелководья могут с повышением уровня то увеличиваться, то уменьшаться.

Можно построить кривую распределения глубин водохранилища при выбранном НПГ, которая представляет собой ту же кривую площадей с осью глубин, направленной вниз, и с началом координат на уровне НПГ: ось абсцисс с тем же масштабом площадей перемещается на уровень НПГ. Площади можно откладывать также в долях целого или в процентах, считая величину F при НПГ за 1,0 или за 100. По графику в новой системе координат можно определять, какая часть площади водохранилища при НПГ имеет глубину больше заданной или находится, например, в пределах глубин от 3 до 4 м и т. п. Эта кривая (при выражении F в км^2) пригодна и для характеристики распределения глубин не только при НПГ, но и при других отметках. Однако для каждой отметки надо соответственно перемещать по вертикали ось абсцисс.

Кривая распределения глубин, как и кривая площадей литорали, используется, например, для проектирования противомалярийных мероприятий на водохранилище.

Для гидроэнергетических целей иногда строится кривая сработки. По оси абсцисс откладываются расходы за счет сработки, а по оси ординат — отметки горизонта воды. Очевидно, на отметке НПГ сработка равна нулю. При сработке расходом Q_1 в течение Δt суток объем наполнения уменьшится на $86\,400\,Q_1\Delta t$. Соответствующая остатку емкости отметка горизонта воды откладывается в принятом масштабе отметок. При расходе Q_2 за тот же срок Δt будет иная отметка остаточного наполнения и т. д. Кривая соответствует только одному сроку сработки водохранилища при раз-

ных расходах. Поэтому иногда приходится строить несколько кривых для сроков сработки Δt, равных 5, 10 суткам, 1 месяцу.

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

Кривая расходов нижнего бьефа соответствует установившемуся или медленно изменяющемуся гидравлическому режиму и строится по гидрометрическим данным. Однако в связи с неточностью измерений, деформацией русла и т. п. точки измеренных расходов несколько разбросаны на графике. Чтобы учесть возможные отклонения, при проектировании рекомендуется гидравлическую характеристику нижнего бьефа принимать в виде пучка кривых — основной кривой и двух огибающих, ограничивающих область возможных колебаний связи расходов и уровней (рис. 15 *б*).

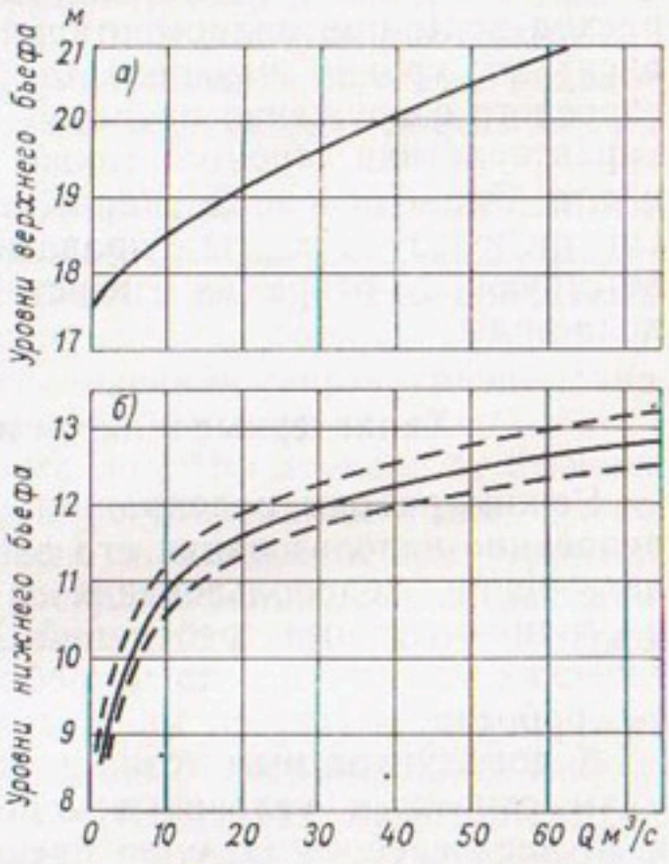


Рис. 15. Кривая пропускной способности водослива плотины (*а*) и кривая связи расходов и уровней в нижнем бьефе плотины (*б*).

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

При быстро изменяющихся расходах воды появляется нестационарный, неустановившийся режим и однозначность связи между расходами и уровнями исчезает. Расчет неустановившегося движения в нижнем и верхнем бьефах изложен в § 33, 45.

Следует отметить, что в результате размыва дна на большом протяжении ниже плотины кривые расходов, главным образом их нижняя часть, в течение нескольких десятилетий будут медленно опускаться, если меженное русло сложено из рыхлого грунта. Это

обстоятельство учитывается при выборе порога шлюза, при проверке высоты всасывания в турбинах ГЭС и т. д.

Гидравлические характеристики водосбросных и водопроводящих сооружений определяют собой условия отвода воды из верхнего бьефа. Расход воды, отводимой в какой-либо момент из водоема, определяется: а) размерами и высотным положением водоприемных и водосбросных отверстий; б) степенью открытия их затворов и в) уровнем верхнего бьефа (уровень нижнего бьефа соответствует перечисленным факторам и определяется по описанной выше кривой расходов).

При заданных размерах сооружений наибольший отводимый расход воды при полном открытии водопропускных отверстий зависит от уровня верхнего бьефа. Такая зависимость для водосбросного сооружения представлена на рис. 15 *а*. Соответствующие характеристики строятся также для водоспусков, турбин, шлюзов и т. п. Это — основные гидравлические характеристики гидроузла. Они используются для управления водохранилищем путем соответствующего открытия отверстий и изменения пропускаемого расхода воды.

Характерные объемы и уровни водохранилища

Режим работы водохранилища означает последовательное чередование использования его запасов и их восполнение при удовлетворении водопользования и дополнительных хозяйственных и ограничительных требований. При этом под влиянием гидрологических условий и хода потребления воды во времени происходит то сработка, то наполнение водохранилища.

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

В верхнем бьефе пределами колебания горизонтов могут быть: при повышении уровней — допустимое затопление земель, отметки сооружений и т. п., при понижении уровней — расположение водозаборных устройств в пределах подпора, судоходные условия и т. п. В нижнем бьефе пределы колебания расходов или уровней также нередко диктуются особенностями гидротехнических устройств и расположением населенных пунктов, промышленных предприятий и различных сооружений (отметки мостов и размеры их отверстий, заложение водоприемников, пропускная способность водоспусков или турбин и т. п.), а также условиями судоходства.

Объем водохранилища является обычно результатом водохозяйственного расчета, определяющего составные части емкости водохранилища — полезный и мертвый объемы. Для пропуска половодий и паводков предусматривается специальный дополнительный объем (форсировка), определяемый гидрологическими

и гидравлическими расчетами с учетом водохозяйственных условий и топографических характеристик водохранилища.

Указанные составные части емкости водохранилища являются отправными величинами для назначения основных подпорных отметок, которые определяют по кривой объемов.

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

Мертвый объем $V_{м.о}$ — несрабатываемая в нормальных условиях эксплуатации часть емкости водохранилища, ограниченная сверху горизонтом мертвого объема (ГМО). Мертвый объем при этом не участвует в регулировании стока, но имеет большое практическое значение. Величина $V_{м.о}$ определяется расчетами заиления, санитарно-техническими требованиями и другими водохозяйственными соображениями в зависимости от поставленных задач (см. § 7).

Допуская гибкость в будущих изменяющихся условиях работы сооружений, мертвый объем нередко делится на две части. Верхняя часть при необходимости может быть в дальнейшем сработана (что и предусматривается заложением водозаборных отверстий) или опорожнена. Нижняя часть, ограниченная сверху уровнем дна водоспуска, не может быть ни сработана, ни опорожнена.

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

Рабочий, или полезный, объем — используемая для регулирования часть емкости, расположенная над ГМО и ограниченная сверху нормальным подпорным горизонтом (НПГ). Так называется тот наивысший уровень, который может длительно поддерживаться подпорными сооружениями. Применительно к НПГ обычно производятся основные расчеты устойчивости сооружений и предусматриваются нормальные запасы надежности.

Для водосливной плотины обычно за НПГ принимают отметку ее гребня. При наличии водосбросных отверстий НПГ отвечает наиболее высокому уровню, который может длительно поддерживаться при закрытых затворах. Частота заполнений водоема до НПГ зависит от тех же причин, что и сработка, и наблюдается в половодье ежегодно или через 2, 3 года и более, т. е. довольно часто. Длительность стояния НПГ колеблется от 0,5—1 до 4—6 месяцев и более, до наступления низких расходов ближайшей межени.

Полный объем водохранилища соответствует отметке НПГ и равен сумме полезного $V_{п}$ и мертвого $V_{м.о}$ объемов.

Объем форсировки — временно заполняемая часть емкости водохранилища, используемая для срезки половодий и паводков с целью уменьшения водосбросных сооружений. При спаде проходящих через водохранилище высоких вод емкость форсировки

немедленно опорожняется. Эта емкость размещается над НПГ и позволяет производить форсировку горизонтов водохранилища, из которых расчетный называется максимальным подпорным горизонтом (МПГ), а предельный допустимый, или поверочный,— катастрофическим подпорным горизонтом (КПГ). При наличии водосбросов с пониженным порогом емкость форсировки используется не только непродолжительно, но и редко. Форсированные уровни связываются с вероятностью их появления.

В некоторых случаях срезка (трансформация) половодий и паводков рассматривается как специальная задача борьбы с наводнениями ниже водохранилища.

В практике встречаются и другие характерные уровни и наполнения, соответствующие методическим условиям регулирования (сезонный, диспетчерский и многолетний объемы, см. § 11, 12, 18)

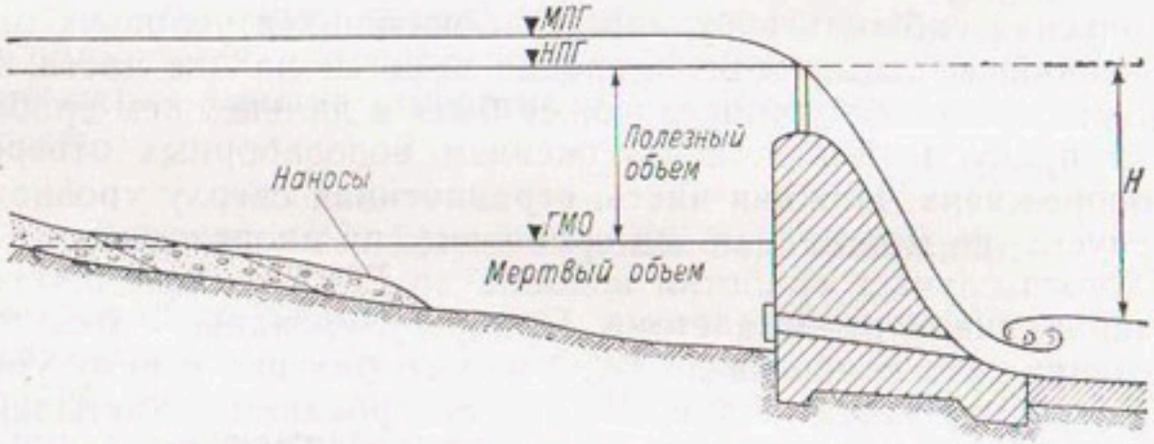


Рис. 16. Схематический продольный профиль водохранилища.

или специфическим особенностям установки [минимальный летний горизонт для ГРЭС (см. § 28), уровень наибольшей навигационной сработки и т. п.]. Расположение основных упомянутых объемов и горизонтов в пределах чаши водохранилища поясняется рис. 16.

Характерные объемы и уровни взаимно связаны между собой. Так, выбирая местоположение и отметку НПГ, мы тем самым устанавливаем полный объем водохранилища и максимальный напор для ГЭС. Назначая отметку ГМО, мы одновременно принимаем глубину сработки, полезную емкость и зависящие от этих величин водохозяйственные параметры: мощности ГЭС, количество воды, отпускаемой потребителю, и т. д.

Размеры водохранилища и сооружения гидроузла должны быть экономически и технически обоснованы. Капиталовложения по гидросооружениям и сопутствующим мероприятиям (обвалование, дренаж и т. п.), показатели по затоплению земель и построек, эксплуатационные издержки по гидроузлу и связанным с ним устройствам в сопоставлении с народнохозяйственным эффектом регулирования стока рассматриваются по вариантам регулирования и служат основой для выбора оптимальных размеров водохранилища. Водохозяйственные расчеты для выбора параметров водохранилища (см. § 5) выполняются в следующем порядке:

а) для намеченного створа гидроузла назначаются варианты НПГ, заведомо включающие окончательно принятый НПГ;

б) для каждого варианта НПГ при использовании подпора для ГЭС назначается несколько вариантов ГМО, т. е. глубины сработки; выполняются водохозяйственные расчеты и технико-экономическое обоснование целесообразного ГМО;

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

По водохранилищам ГЭС граница сработки расположена ниже НПГ на 20—30% максимального напора, что примерно соответствует нормальной работе турбин и принимается в начальных стадиях проектирования.

По водохранилищам неэнергетического назначения работы, указанные в п. «б», отпадают.

Из названных характерных уровней водохранилища достаточно жестко закрепляется НПГ, особенно для водосливной плотины без затворов. Промежуточные характерные уровни, как отмечают С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61], не следует принимать строго соответствующими режиму работы по условиям водохозяйственных расчетов. В будущем, по мере развития народного хозяйства или при возведении новых ступеней каскада, неизбежны некоторые отклонения от проектных предположений, полностью предусмотреть которые на десятилетия вперед невозможно.

С течением времени могут измениться режим и функции отдельных водохранилищ. Сооружения должны допускать необходимую гибкость будущей эксплуатации установок. Основные размеры их и влияющие на них характерные уровни (самый низкий горизонт сработки, самый низкий навигационный уровень и др.) должны назначаться в нормативном порядке. При этом учитываются проектные результаты водохозяйственного режима и оцениваемые по общим соображениям возможные отклонения от него, а также и последующие (за пределами сроков планирования) изменения условий водопотребления и водопользования.

Размеры водохранилища должны удовлетворять следующим условиям водного хозяйства и общим гидротехническим требованиям.

1. Наряду с основным назначением водохранилища, например для водоснабжения населенных пунктов или для энергетики, должны быть рассмотрены и обоснованы возможности комплексного удовлетворения водой смежных отраслей водного хозяйства (водоснабжение промпредприятий, орошение, рыборазведение и т. п.). Установленное водопотребление должно полностью удовлетворяться с заданной обеспеченностью.

2. Объем водохранилища не должен быть чрезмерным (не более, например, двух объемов среднегодового стока). В противном случае оно длительное время может оставаться незаполненным, не обеспечивающим водоснабжения в пусковой период установки, который при этом может быть затяжным. В таких условиях имеет значение заблаговременность строительства водохранилища,

а также согласованный план подключения водопользователей и наращивания водопотребления до проектного в пусковой период. Упомянутое ограничение объема водохранилища означает, что при большой изменчивости годового стока (например, в Заволжье, Казахстане и других районах) водопотребление вместе с потерями практически не может превышать 50—60% среднего годового стока $Г_0$.

3. Средняя глубина водохранилища при НПГ должна быть в засушливых районах не менее 4,0—5,0 м. При меньших глубинах регулирование стока становится малоэффективным в связи с большими потерями воды на испарение. При часто наблюдающихся (летом) наполнениях водохранилища не должно быть значительных мелководных площадей с глубинами менее 2,0 м (по санитарно-техническим условиям, из-за больших потерь на испарение и т. п.). В ряде случаев целесообразно ограждение мелководий дамбами.

4. Регулирование стока изменяет качество воды. Поскольку при различной зарегулированности морфометрические характеристики водохранилища изменяются, то в засушливых районах с большим испарением НПГ и прочие показатели водохранилища могут быть ограничены требуемыми нормативами качества воды, по расчету — прогнозу.

В целом водохранилище должно вполне удовлетворять специфическим особенностям основного водопользователя. Для ГЭС это ограниченная высота сливной призмы; для орошения — лимитирующие отметки командования поливными площадями; для охлаждающих водохранилищ ГРЭС — соблюдение необходимой охлаждающей площади зеркала и средней глубины (не менее 2—2,5 м) в пределах летней зоны циркуляции в последнем году сработки водохранилища (несколько выше ГМО, см. § 28).

§ 7. МЕРТВЫЙ ОБЪЕМ И ЗАИЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

Общие условия определения мертвого объема

Отложение наносов. Этот фактор часто является основным при выборе мертвого объема. Особенность процесса заиления состоит в том, что наносы распределяются по водоему неравномерно и не по самой глубокой части, а соответственно гидравлическому режиму в зоне подпора. В результате мертвый объем заполняется медленнее, чем это происходило бы при отложении всей массы задерживаемых наносов в пониженных частях мертвого объема. Но одновременно начинает заполняться расположенная над ним емкость водохранилища, особенно в хвостовой его части и по отвершкам в притоках. Наряду с соблюдением некоторых других требований, отмеченных ниже, мертвый объем определяется обычно для водоемов промышленного и питьевого водоснабжения из расчета заиления этой части емкости в течение периода от 25—30 до 50 лет.

По водохранилищам иного назначения (охлаждение оборудования ГРЭС, ирригация, рыборазведение, водный транспорт, гидроэнергетика и др.) характеристика заиления приводится наряду с другими конкретными условиями, определяющими величину мертвого объема, но в большинстве случаев не является решающей.

Обеспечение напора. При образовании водохранилища в связи с энергетическим использованием водотока снижение напора на ГЭС допускается обычно не более 20—30% полного напора (при отметке НПГ в межень) в соответствии с характеристиками турбин (см. § 31). В связи с этим отметка ГМО водохранилища определяется допустимым, сравнительно небольшим снижением напора, а мертвый объем при этом обычно во много раз превышает емкость, потребную по условию заиления за длительный период.

Выбор величины сработки (для заданного НПГ), а значит и выбор ГМО представляет собой технико-экономическую задачу, решаемую на основе ряда вариантов гидроэнергетических расчетов (см. § 34).

Обеспечение судоходства. Подпорные бьефы, создаваемые на судоходных реках для гидроэнергетических целей, повышают уровни воды на длинных речных участках, обеспечивая на них необходимые судоходные глубины. Проектные глубины на этих участках определяют нижнюю расчетную границу уровней, которая не должна быть нарушена режимом ГЭС в период навигации.

Обеспечение ирригационного командования. Назначение ГМО водохранилища при использовании его для самотечного орошения земель диктуется высотным положением поливных площадей и их размерами. Отметка ГМО назначается при этом с таким расчетом, чтобы при сработке водохранилища до ГМО было обеспечено поступление воды на поля (с учетом уклона в каналах по пути ее движения).

Учет высоты водоподъема. Если использование отдачи водохранилища связано с подачей воды потребителю насосной станцией, то, очевидно, при повышении ГМО уменьшается высота подачи, что ведет к уменьшению мощности насосной станции и годовых эксплуатационных расходов. Так обстоит дело, например, с водохранилищами ГРЭС, на которые для охлаждения конденсаторов подается громадное количество воды. Аналогичные условия создаются при машинном орошении из водохранилищ, при водоснабжении из подпорного бьефа предприятий и населенных мест.

Нужно иметь в виду, что повышение ГМО вызывает (при данном полезном объеме) повышение НПГ на меньшую величину.

Санитарно-технические условия. Если водохранилище имеет такую форму, при которой в теплое время года (май—сентябрь) уровни в результате сработки по заданному режиму часто приближаются ко дну или к отметкам обширных литоралей, то при низком ГМО возможно прогревание воды, зарастание водохранилища и возникновение анофелогенных условий. Появляется множество плавающих мельчайших водорослей и прочих

микроорганизмов — развивается планктон, наблюдается цветение и неустранимый привкус и запах воды, в результате чего она может оказаться непригодной для питьевого водоснабжения и пищевой промышленности. Поэтому необходимо назначать такую отметку ГМО, которая обеспечила бы достаточные глубины в водоеме при летних его уровнях, в особенности если эти уровни могут появляться часто (например, при сезонном, годичном или частично многолетнем регулировании стока; при высоком многолетнем регулировании уровни водоема приближаются к ГМО довольно редко).

Во избежание неблагоприятных санитарных последствий при устройстве водохранилищ проекты водоемов необходимо согласовывать с органами санитарного надзора.

Рыбное хозяйство. Почти во всяком водохранилище можно организовать рыбоводство и рыболовство, поэтому всегда следует его использовать для данной цели. При сработке водохранилища до ГМО рыба скопляется в мертвом объеме, поэтому его размеры должны быть такими, чтобы на все время низких горизонтов имелись достаточные для рыбы площадь, пространство, корм и воздух. Следует также иметь в виду при низких горизонтах образование льда, который может и без того сокращенное водное пространство сделать недопустимо малым для существования рыб. Следует исключать такие отметки ГМО, особенно в случаях ежегодной сработки водохранилища (например, для работы ГЭС и т. п.), при которых к концу зимы лед губит рыбу, прижимая ее на больших пространствах к поверхности поймы.

Высотное расположение водоприемников. При сработанном водохранилище должна соблюдаться глубина воды, необходимая для надежной работы водоприемников. Эта глубина состоит из трех частей: 1) превышения низа водоприемных отверстий над дном водоема, 2) высоты отверстий и 3) глубины воды над верхней их кромкой. Первая часть определяется с учетом возможного в будущем подъема дна в результате его переформирования и заполнения водоема наносами.

Превышение уровня над верхней кромкой отверстий назначается с учетом толщины ледяного покрова, если наиболее глубокая сработка водоема приходится на зиму. Известное погружение водоприемных отверстий под уровень требуется также для устранения подсасывания воздуха насосами.

Заиление водохранилища

Объем заиления водохранилища определяется по количеству твердого стока, принимая срок заиления 20—30 лет для обычных водохранилищ местного значения, строящихся для промышленного и питьевого водоснабжения, ирригации и рыбоводства. Для крупных водохранилищ районного назначения расчет емкости, выделяемой на заиление, производится (в случае необходимости) за более длительный срок — 50 лет. Годовое количество наносов, прино-

симых рекой, определяется по фактическим наблюдениям на данной реке или на реках-аналогах.

В табл. 14 приводятся данные о заилении нескольких водоемов, полученные на основе зондирования отложений ила. Как видно из данных этой таблицы, модули заиления по водохранилищам Донбасса довольно близки между собой и только по отдельным бассейнам отмечается некоторое отклонение их в зависимости от местных условий (почвы, геологии, рельефа, ландшафта и т. п.).

Таблица 14

Показатели заиления водохранилищ Донбасса

Характеристика водохранилища	Номер водохранилища					
	1	2	3	4	5	6
Площадь водосбора, км²	430	403	130,5	271	540	1113
Среднегодовой сток, млн. м³	13,6	23,54	8,22	17,48	34,0	45,6
Коэффициент регулирования стока	0,77	0,72	0,69	0,67	—	0,70
Общий объем водохранилища, млн. м³	25,0	26,8	8,5	16,3	1,33	52,0
Общий объем заиления, тыс. м³	988	687	273	436	1000	4000
Срок эксплуатации, лет	7	7	7	5	7	11
Среднегодовое заиление, тыс. м³/год	141	98	39	87	143	364
Модуль заиления, м³/год с 1 км²	328	243	300	320	265	327

Натурное обследование (путем зондирования) заиления водохранилищ дает обобщенную (суммарную) характеристику заиления, соответствующую данным физико-географическим условиям. В связи с этим такой метод определения интенсивности заиления является весьма целесообразным. При этом требуется тщательное проведение зондирования ила и совмещение поперечников водохранилища, относящихся ко времени его строительства и к моменту исследования.

С одной стороны, расчет заиления по данным о твердом стоке реки не дает полной величины отложений, так как при этом не учитывается значительная составляющая заиления — дополнительное поступление твердого материала в связи с переформированием береговой полосы вокруг вновь образовавшегося водного пространства (размыв склонов при волнении, обрушение откосов и т. п.). С другой стороны, расчет по данным о заилении водоемов-аналогов с небольшим сроком существования последних содержит известный запас, поскольку процесс переформирования береговой полосы происходит наиболее интенсивно в первые годы эксплуатации водоема и с течением времени затухает.

В заключение отметим, что в больших водоемах (по отношению к среднему годовому стоку) объем отложений обычно невелик по сравнению со всей емкостью водоема. Для водохранилищ небольшой относительной емкости вопросы переформирования русла требуют специального исследования методами теории русловых процессов [100].

Режим заиления водохранилищ и его расчеты излагаются в работах [23, 67, 68, 94, 123, 138].

§ 8. ПОТЕРИ ВОДЫ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩА И БОРЬБА С НИМИ

Грунтовые водоемы

Водохранилище, регулируя речной сток, расходует воду для снабжения потребителей, частично же теряет ее на испарение с водной поверхности[1] и фильтрацию. В некоторых случаях подлежат расчету затраты воды на ледообразование. Здесь рассмотрены лишь приемы расчета нормативов по основным видам потерь. Конкретное определение потерь требует совместной оценки этих нормативов и колебаний емкости водохранилища, что относится к регулированию стока (см. § 14).

В заключение изложены средства борьбы с потерями воды из водохранилища и за его пределами. Борьба с потерями воды за пределами водохранилища рассматривается в разрезе повышения его эффективности, а также относится к случаям с незначительным регулированием или без него, что соответствует простейшим водохозяйственным установкам.

Потери на испарение

Создание водохранилища нарушает водный баланс до рассматриваемого створа, для которого по гидрометрическим данным за период до устройства водохранилища устанавливается норма стока со всего замыкаемого водосбора, обеспеченные величины стока и т. п.

При возникновении водохранилища некоторая часть суши водосбора заменяется водным зеркалом. На эту часть суши до образования водоема выпадали осадки, некоторая часть их, за исключением потерь с суши, стекала в реку. На том же пространстве в новых условиях при тех же осадках X потери будут иными, равными испарению с водной поверхности $E_в$, в связи с чем располагаемый сток изменяется.

Таким образом, изменения, вносимые водохранилищем в водный баланс, выражаются разностью $E_д$ объема воды, которая в прошлом поступала в виде стока Y с затопляемой части водо-

[1] На охлаждающих водоемах тепловых электростанций испарение воды от искусственного подогрева ее в конденсаторах не относится к потерям в обычном смысле, а составляет одну из статей технологической водопотребности ГРЭС. В таком случае полезная отдача водохранилища должна обеспечивать покрытие этой водопотребности.

сбора, и количества воды $D=X-E_в$, поступающей через водную поверхность создаваемого водохранилища, т. е.

$$E_д=Y-D. \tag{13}$$

Сток Y (его норма, многолетние колебания и внутригодовое распределение) обычно отличается от аналогичных характеристик для всего замыкаемого водосбора и соответствует конкретным физико-географическим условиям участка долины, затапливаемого водохранилищем.

Величина D в областях с влажным климатом положительна, т. е. осадков на водоем выпадает больше, чем испаряется с него; в засушливых областях, наоборот, эта величина отрицательна, т. е. осадки меньше, чем испарение.

Разность $E_д$ для южных районов СССР положительна как для годовых величин, средних за многолетие, так и особенно для засушливых лет или периодов. При этом после устройства водохранилища с площади, покрываемой водой, поступит меньше воды, чем с той же площади до его устройства [1]. Иначе говоря, водная поверхность теряет воды больше, чем то же пространство суши до затопления.

Разность $E_д$ представляет собой результирующие, или дополнительные потери, возникающие при создании водного зеркала и являющиеся предметом расчета при проектировании. Поэтому приведем более подробную характеристику элементов, образующих разность $E_д$.

Входящая в равенство (13) величина Y равна

$$Y=X-E_с \pm \Delta W, \tag{14}$$

где $E_с$ — испарение с суши; ΔW — изменение запасов влаги в водосборе, в данном случае не во всем водосборе, а только в той части его, для которой определяется баланс по равенству (14).

Подставляя выражение (14) в (13), находим

$$E_д=Y-D=E_в-E_с \pm \Delta W. \tag{15}$$

Таким образом, дополнительное, или результирующее, испарение равно разности между испарением с водной поверхности и испарением с водосбора, исправленной на величину изменения запасов влаги в нем ΔW.

Как известно, значение $\pm\Delta W$ представляет влагу, переходящую от одного периода к другому (например, твердые осадки, изменения

[1] В северных и северо-западных районах СССР в некоторых случаях, по-видимому, возможны отрицательные годовые разности $E_д$, причем после устройства водохранилища с затапливаемой площади поступает больше воды, чем с той же площади до затопления. Такие же случаи возможны и в условиях Украины при создании водохранилищ на заболоченных пространствах, для которых потери на испарение за год могут быть отрицательными, так как $E_с>E_в$. В таких случаях со всей площади водохранилища или с соответствующей его части потери на испарение можно приравнять к нулю.

запасов подземных вод и т. п.), причем происходит накопление влаги за счет осадков в текущий период или отдача за счет осадков прошлого времени. При расчетах среднегодовых величин за многолетний период значение $\pm\Delta W$, приходящееся на один год, становится небольшим и им можно пренебречь. В таком случае

$$\overline{E}_д=\overline{E}_в-\overline{E}_с, \tag{16}$$

а по уравнению (14) норма испарения с суши будет равна норме осадков минус норма стока (все эти элементы относятся к конкретному пространству в пределах зоны затопления)

$$\overline{E}_с=\overline{X}-\overline{Y}.$$

В результате уравнение (16) можно переписать в виде

$$\overline{E}_д=\overline{E}_в-\overline{X}+\overline{Y}. \tag{17}$$

Уравнения (16) и (17) служат для определения средних за многолетие расчетных (дополнительных) потерь на испарение из вновь образуемых водохранилищ.

Для относительно коротких периодов (меньше года) изменениями запасов влаги в водосборе пренебрегать нельзя. Распределение по временам года величины $E_в$ значительно отличается от распределения разности $E_д=E_в-E_с$. Поэтому для коротких отрезков времени (сезонов, месяцев) величину $E_с\pm\Delta W$ следует учитывать дифференцированно по этим отрезкам времени как разность между осадками X и стоком Y в естественном состоянии, т. е. по выражению

$$E_д=E_в-(X-Y). \tag{18}$$

Месячные осадки и сток учитываются по среднему или засушливому году. При этом осадки принимаются по данным ближайших метеостанций, а сток Y — по результатам наблюдений за прошлые годы на рассматриваемом водосборе или на реке-аналоге. За неимением данных о стоке он может быть принят по карте изолиний, а его внутригодовое распределение — по литературным источникам [6, 23 и др.] или по стоку реки-аналога.

А. В. Огиевский [74] вводит соотношение

$$E_с\pm\Delta W=X-Y=X(1-\alpha_ф),$$

где приближенные значения величины $\alpha_ф=Y:X$ (условно называемой коэффициентом стока с затапливаемой части долины) приводятся в зависимости от сезона и условий стока (почво-грунтов, растительности и др.).

Таким образом, по Огиевскому,

$$E_д=E_в-(1-\alpha_ф)X. \tag{18'}$$

Для определения величины $E_в$ существует несколько методов: 1) метод водного баланса; 2) наблюдения по испарителям или испарительным бассейнам; 3) метод теплового баланса; 4) эмпирические формулы и графики.

Первый метод применяется для существующих водохранилищ с хорошо поставленным учетом всех других элементов водного баланса (приток, утечки, осадки на зеркало водоема). Результаты используются для новостроек в аналогичных условиях. Таким же образом используются данные наблюдений по испарителям. Третий и четвертый методы применяются для существующих и проектируемых водохранилищ.

В настоящее время за основу принята обобщенная расчетная формула ГГИ, полученная Б. Д. Зайковым, А. П. Браславским и Э. А. Викулиной, и методика расчета входящих в эту формулу параметров, основанная на использовании метода теплового баланса с учетом трансформации метеорологических элементов над водной поверхностью [124].

Упомянутая формула для $E_в$ мм/сут. имеет вид

$$E_в = 0{,}14\,(e_0 - e_{200})(1 + 0{,}72 w_{200}), \qquad (19)$$

где e_0 — максимальная упругость пара при температуре поверхности воды, мб; e_{200}, w_{200} — влажность воздуха (мб) и скорость ветра (м/с) на высоте 200 см над поверхностью воды. К этой высоте наблюденные по флюгеру скорости ветра приводятся с учетом коэффициентов по таблицам [124].

В Указаниях [124] приводятся способы определения температур водоема, а также температур и влажности воздуха над ним, необходимых для расчета $E_в$ по месяцам.

На основе расчетов по месячным интервалам за длительный период и для нескольких опорных пунктов определяются годовые нормы испарения $\overline{E}_в$.

Для малых водоемов, с площадью зеркала до 5 км^2,

$$\overline{E}_в = E_{20} K_H K_з \beta \text{ мм/год}, \qquad (20)$$

где E_{20} — испарение с бассейна площадью 20 м^2, определяемое по многолетним наблюдениям или по карте (рис. 17); K_H, $K_з$, β — поправочные коэффициенты на глубину, защищенность и площадь водоема [124].

По рис. 17, а также изолиниям в работах [18, 30, 36] видно, что наименьшая величина $\overline{E}_в = 20 \div 40$ см относится к лесотундре. В лесной зоне она составляет 40—60 см, в лесостепной — 60—80 см, в степной — 80—100 см, в полупустыне и пустыне — 100—180 см в год.

Способы учета потерь на испарение зависят от роли этих потерь и от методов расчета регулирования стока. При расчетах режима работы водоема по календарным величинам стока за ряд лет испарение определяется соответственно конкретным метеорологическим условиям каждого года в этом ряду. Чаще ограничиваются

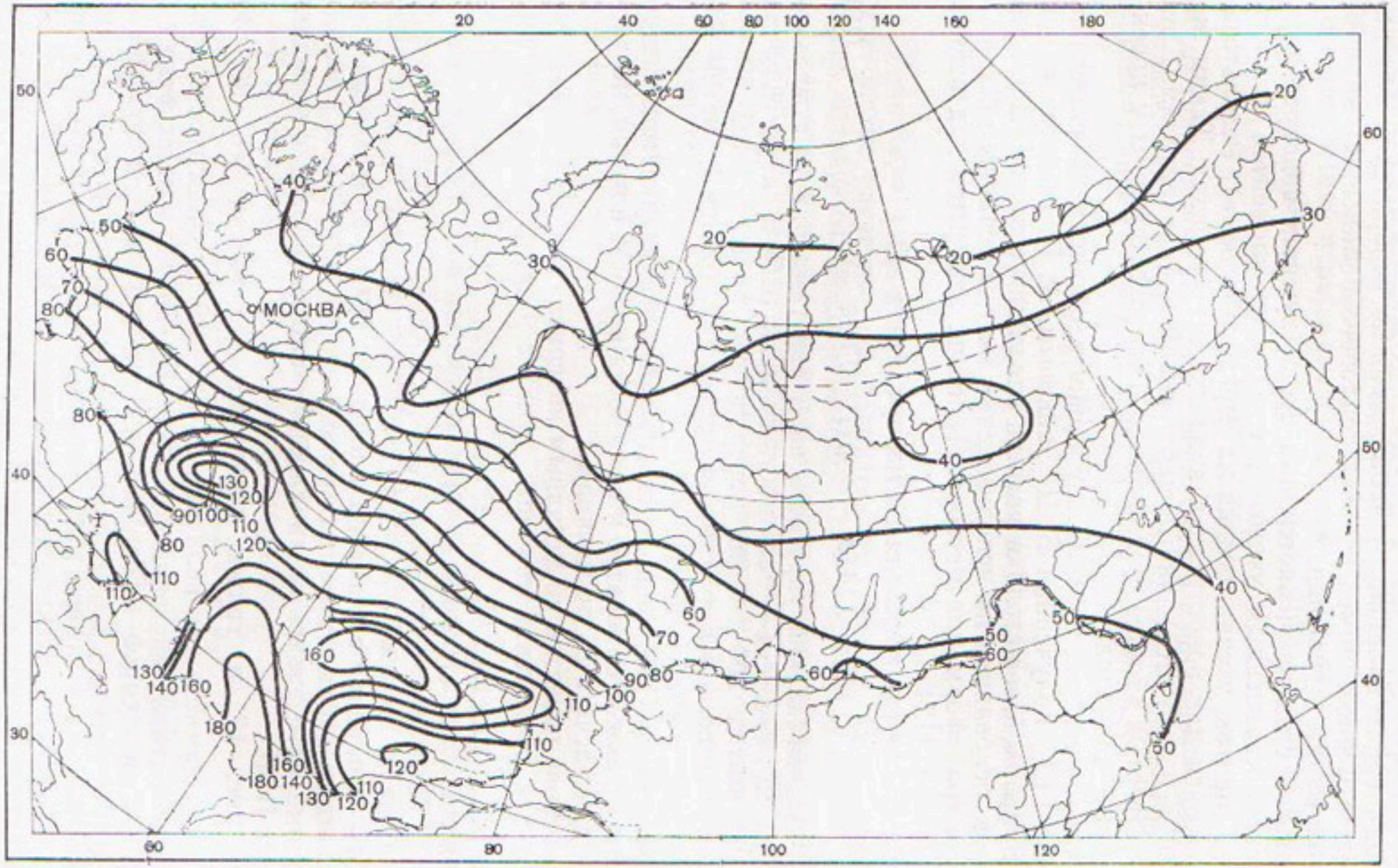


Рис. 17. Изолинии норм испарения (в см/год) с водной поверхности бассейна площадью 20 м².

расчетом испарения для трех характерных по водности лет — многоводного, среднего и маловодного. Полученные величины относят к другим годам, близким по водности.

В расчетах регулирования стока по обобщенным методам потери на испарение оцениваются также обобщенно. При многолетнем регулировании, когда сработка водохранилища длится несколько лет подряд, потери определяются для группы маловодных лет. Средняя высота годового слоя потерь для периода n лет находится при коэффициенте изменчивости $C_v^{(n)} = C_v : \sqrt{n}$ и обеспеченности $P' = 100 - P$, где C_v — коэффициент изменчивости высоты слоя потерь за отдельные годы, n — число совместно рассматриваемых лет, P — обеспеченность отдачи водохранилища.

При этом в запас надежности расчетов допускается совпадение маловодья с резкой засушливостью. Иногда такой расчет применяется не к потерям, а к годовым величинам $E_в$. Тогда расчетная

Таблица 15

Потери на испарение из некоторых водохранилищ, мм/год

Водохранилище	Область	$E_в$	X	Y	$E_с$	$E_д$
Соликамское	Пермская	471	575	252	323	148
Чебоксарское	Чувашская АССР	528	494	161	333	195
п. Отрада	Татарская АССР	629	381	126	255	374
Саратовское	Саратовская	819	377	47	330	489
Волгоградское	Волгоградская	999	387	66	321	678

Таблица 16

Месячные потери на испарение на севере и юге СССР, мм

Месяц	Соликамское водохранилище					Волгоградское водохранилище				
	$E_в$	X	Y	$E_с \pm \Delta W$	$E_д$	$E_в$	X	Y	$E_с \pm \Delta W$	$E_д$
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	65	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	33	—33	0	38	1	37	—37
Год	471	575	252	323	148	999	387	66	321	678

величина $E_в$ находится по норме $\overline{E}_в$. $C_v=0{,}15$ для зон I—V и $C_v=0{,}10$ для зон VI—VIII (см. приложение I) при $C_s=0$.

Распределение $E_в$ по месяцам принимается для малых водохранилищ согласно приложению II, для средних и больших по рассчитанным месячным величинам испарения.

О распределении $E_в$ в году см. в работах [18, 23, 30, 36].

Если в общем водном балансе водохранилища потери незначительны, они учитываются упрощенно и принимаются в размере их среднего многолетнего слоя.

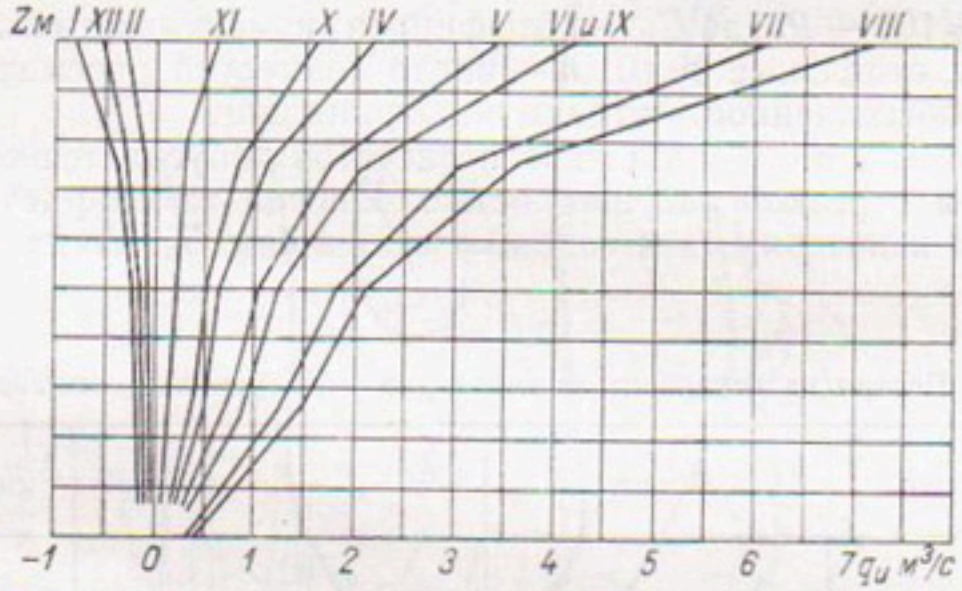


Рис. 18. График для расчета потерь воды из водохранилища на испарение.

Распределение потерь на испарение с севера на юг и в пределах года приведено в табл. 15 и 16 (по данным расчета по эмпирическим формулам для ряда водоемов) [61].

Годовые потери на испарение могут изменяться в широких пределах. Так, для Волгоградского водохранилища при норме потерь 678 мм/год, коэффициенте изменчивости 0,54, коэффициенте асимметрии 0 наибольшие потери ($P'=5\%$) равны 1278 мм/год, наименьшие ($P=95\%$) — 78 мм/год.

При массовых водохозяйственных расчетах по ряду вариантов водохранилища для облегчения учета потерь на испарение иногда строятся вспомогательные графики, показывающие для каждого месяца потери в зависимости от уровня Z водохранилища (рис. 18).

Пример расчета. На нижнем участке р. Оскола (восточнее Харькова) запроектировано водохранилище для водоснабжения с отдачей, обеспеченной на 97%. Наиболее вероятный период сработки водохранилища — один год плюс межень, т. е. 2 года. Требуется определить расчетные потери воды из водохранилища на испарение.

1. По формуле (19) за многолетний период определяем норму испарения $\overline{E}_в=760$ мм/год. При коэффициенте вариации испарения $C_v=0{,}12$ (см. [23]) находим $C_v^{(2)}=0{,}12:\sqrt{2}=0{,}085$; $C_s=2C_v^{(2)}=2\cdot 0{,}085=0{,}17$. По таблице Рыбкина для обеспеченности $100-97=3\%$ находим $K_в^2=1{,}166$ и $E_в^{(2)}=1{,}166\cdot 760=886$ мм/год.

Распределение испарения $E_в$ по месяцам можно принять осредненным (по среднему году или году с максимальным испарением [23]).

2. Норма осадков для района водохранилища принята по данным для г. Изюма равной 511 мм/год. При коэффициенте вариации годовых осадков $C_v = 0{,}25$ находим $C_v^{(2)} = 0{,}25 : \sqrt{2} = 0{,}177$; при $C_s = 2C_v^{(2)}$ и $P = 97\%$ определяем $K_X^{(2)} = 0{,}697$ и $X = 0{,}697 \cdot 511 = 357$ мм/год. В году осадки распределены по осредненным за многолетие месячным данным.

3. Полученные величины осадков умножаем на $(1 - \alpha_\Phi)$ соответственно средним условиям по нормативам А. В. Огиевского [74]. В результате находим испарение с суши E_c. Разности $E_в$ и E_c и есть расчетные (дополнительные) потери на испарение $E_д$ (табл. 17).

Таблица 17

Расчетные потери на испарение

Элементы вычислений	I	II	III	IV	V	VI
Испарение $E_в$ мм	—	—	—	62	111	133
Осадки X мм	24	17	23	27	38	47
$1 - \alpha_\Phi$	1,0	1,0	0,50	0,50	0,80	0,80
$X(1 - \alpha_\Phi)$ мм	24	17	12	13	30	38
Потери $E_д = E_в - X(1 - \alpha_\Phi)$ мм	—24	—17	—12	49	81	95

Элементы вычислений	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Сумма
Испарение $E_в$ мм	186	182	119	62	31	—	886
Осадки X мм	47	32	22	24	27	29	357
$1 - \alpha_\Phi$	0,80	0,80	0,80	0,60	0,60	1,0	—
$X(1 - \alpha_\Phi)$ мм	38	25	18	14	16	29	274
Потери $E_д = E_в - X(1 - \alpha_\Phi)$ мм	148	157	101	48	15	—29	612

Как видно из расчета, потери на испарение составляют 612 мм/год, причем в теплую часть года потери равны 694 мм, но в холодное время они отрицательны, т. е. происходит пополнение водохранилища на 82 мм.

Потери на фильтрацию

Утечки из водохранилища могут происходить через борта и дно водохранилища (в соседние с ним бассейны), под плотину, в обход ее, а также через конструкции плотины и других перекрывающих устройств (затворов, шлюзных ворот, направляющих аппаратов турбин при закрытом их состоянии и т. п.).

На величину фильтрации влияют следующие обстоятельства.

1. Гидрогеологическое строение створа плотины и чаши водохранилища — решающий фактор сохранения воды в нем. Если поверхность грунтовых вод на склонах, примыкающих к водохранилищу, располагается выше намечаемого НПГ (судя по отметкам воды в колодцах, скважинах, родниках и т. п.), то это является гарантией, что утечки из водохранилища не будет.

В случае положения грунтовых вод на подземном водоразделе вокруг чаши водохранилища ниже НПГ, что обычно бывает при наличии проницаемых (галечники, крупнозернистые пески) и

трещиноватых пород, гидрогеологические условия неблагоприятны для устройства водохранилища, так как при этом происходят большие потери на фильтрацию или просто вода не удерживается. Поскольку такие случаи встречаются часто (например, пустое водохранилище Саржин Яр в окрестностях Харькова), то гидрогеологическим особенностям долины каждый раз должно уделяться серьезное внимание при изысканиях.

Аналогичную роль для сохранения воды в водохранилище имеют гидрогеологические условия, относящиеся к створу плотины. Бывает так, что утечка в стороны исключается, а вдоль долины через створ сооружений при наличии водопроницаемых или трещиноватых пород возможна фильтрация под плотину и в обход ее.

Особое значение приобретает фильтрация при строительстве водохранилищ в карстовых районах, где в долинах залегают растворимые и выщелачиваемые водой горные породы (известковые, гипсоносные и т. п.). В таких породах при движении воды возникают трещины и пещеры, пропускающие иногда мощные подземные потоки.

Наличие карста может оказаться препятствием для создания водохранилища из-за опасности большой утечки воды. Таким примером является водохранилище Кизиль-Тары на Южном берегу Крыма с плотиной высотой 15 м, примыкающей к массивам карстовых пород, вследствие чего вся вода из водохранилища уходит. К не менее опасным относятся случаи сооружения водохранилищ на суходолах, коренными породами в которых являются трещиноватые песчаники, известняки или сланцы, прикрытые сверху даже мощным слоем лёсса, который, как известно, слабо проницаем в горизонтальном направлении, но очень водопроницаем сверху вниз, поскольку имеет вертикально столбчатую структуру. При такой структуре покровного пласта и при наличии водопроводящих коренных пород во время интенсивного притока воды появляются провальные воронки, которые у уреза воды видны на глаз, и вода вскоре уходит.

Водоемы, не удерживающие воду, встречаются в южных засушливых районах СССР. Поэтому при изысканиях должно быть тщательно проверено наличие подземных вод, высота их стояния и уклон их поверхности по отношению к тальвегу, нижняя граница залегания трещиноватых пород (как отметка для НПГ) и т. п.

2. Конструкция плотины и других водоперекрывающих сооружений влияет на величину утечки из водохранилища, так как возможна фильтрация через тело плотины, уплотняющие устройства в затворах и т. п. При этом фильтрация через земляные плотины обычно бывает значительнее фильтрации через преграды из более плотного материала. Однако современная гидротехническая практика в состоянии и для земляных плотин снизить фильтрацию до минимума.

Утечка через уплотнения затворов не представляет опасности, если она ничтожна по сравнению с притоком и отдачей водохранилища или если водозабор расположен по реке ниже плотины.

Но в тех случаях, когда отдача водоема невелика, как обычно бывает при регулировании стока малых рек, фильтрация через уплотнения затворов может значительно нарушить водобалансовые расчеты, особенно если запроектирован значительный водосбросной фронт с затворами большого напора. В таких условиях для обеспечения расчетной отдачи может оказаться невозможным применение плотины с затворами на водосбросе или же потребуется гарантия особо тщательного изготовления уплотнений к ним.

3. При одних и тех же гидрогеологических условиях и конструкциях сооружений на величину фильтрации влияет напор на сооружения, а также ширина долины на уровне НПГ в створе плотины. Чем больше напор и ширина долины, тем больше будет утечка из водохранилища. Это обстоятельство заставляет иногда ограничивать высоту подпора воды.

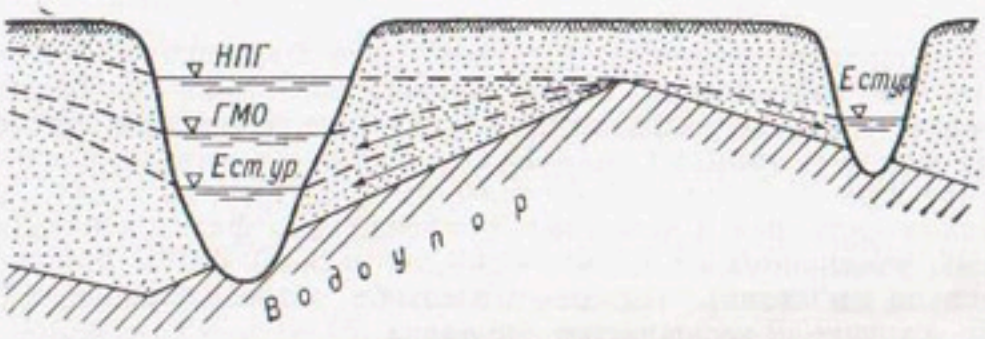


Рис. 19. Зоны насыщения грунта при подпоре уровня воды в реке.

4. С течением времени фильтрация из водохранилища изменяется. В первый год работы водохранилища фильтрация обычно бывает более значительной, чем в последующие годы. Это объясняется не только отсутствием кольматажа, но также и тем, что в первый год происходит насыщение водой грунта, образующего чашу водохранилища.

Потери на насыщение грунта можно разделить на безвозвратные и временные. К безвозвратным потерям относится первичное насыщение грунта между кривыми подпора грунтовых вод: а) естественной и б) соответствующей подпору от ГМО (рис. 19). Временные утечки соответствуют насыщению пород (с последующим возвратом воды) при колебании уровня воды между НПГ (или МПГ) и ГМО.

Со временем в результате кольматажа чаши илистыми и глинистыми частицами и после первичных затрат воды на насыщение грунта фильтрация уменьшается, иногда в течение длительного ряда лет. Так, фильтрационные потери из водохранилища Дир Флэт (США), построенного в тяжелых геологических условиях (горный сильно проницаемый аллювий), в период начального наполнения (1909—1911 гг.) достигали 11,8—10 м/год. В дальнейшем фильтрация стала снижаться и к 1917 г. упала до 1,4 м/год, оставаясь все же значительно выше обычных норм.

Согласно работе И. А. Кузника [66], при довольно тщательном измерении элементов водного баланса по трем водохранилищам Заволжья, построенным в 1937—1938 гг., получены величины фильтрации по годам (табл. 18).

Таблица 18

Фильтрация из водохранилищ Заволжья, мм/год

Водохранилище	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	—	—

Все три водохранилища имеют сравнительно благоприятные геологические условия. Долина Толстовского водохранилища заполнена делювиальными суглинками, водоупором является глина. Чаша Домашкинского водоема размещается в основном в глинах, чаша Кутулукского — в глинах и суглинках. На правом берегу близ Кутулукской плотины имеются выходы песка, левый берег сложен древним аллювием и делювием. Коэффициенты фильтрации для всех трех водохранилищ изменяются от 1,3 м/сутки (для песков) до 0,2 м/сутки и меньше (для суглинков и глин). Самое маленькое водохранилище — Толстовское (2 млн. м^3), крупнее Домашкинское (порядка 20 млн. м^3) и самое крупное — Кутулукское. Кутулукское водохранилище было заполнено на втором году его работы, а Толстовское и Домашкинское — только в 1941 г. (до того они работали при относительно низких уровнях). Поэтому и наибольшая фильтрация здесь отмечается дважды: в первый год эксплуатации и в год заполнения до НПГ (1941).

Понижение фильтрации с течением времени отмечается на примерах Кутулукского (от 1130 мм в первый год до 325 мм на четвертый год) и Толстовского водохранилищ.

Анализируя кривые депрессии на этих водохранилищах, И. А. Кузник считает, что стабилизация фильтрационных потерь в обычных геологических условиях наступает на третий-четвертый год после наполнения водохранилища.

Как видно из приведенного, фильтрация из водохранилища — очень сложное и малоизученное явление. Данные о фильтрации из водохранилищ очень скудны в связи с крайней трудностью ее измерения. Поэтому потери на фильтрацию под плотину и в обход ее определяются, согласно теории движения грунтовых вод, по методу электрогидродинамических аналогий. Потери воды через тело земляной плотины подсчитываются по формулам Н. Н. Павловского, а через уплотняющие устройства затворов — по обычным формулам гидравлики.

Фильтрацию из водохранилища в условиях эксплуатации можно определить по методу водного баланса за некоторый промежуток времени, исходя из уравнения

$$V_н + H + П - И - B - C - Ф = V_к,$$

где $V_н$ и $V_к$ — начальный и конечный объемы водохранилища; H — осадки за то же время; $П$ — приток с водосбора; $И$ — испарение

с зеркала; B — водопотребление; C — холостой сброс. Если все эти величины измерены в натуре, то искомые потери на фильтрацию Φ находятся из приведенного уравнения. Точность результата зависит от возможных ошибок δ измерения других статей баланса: найдем не Φ, а $\Phi+\sum\delta$, причем $\sum\delta$ может быть значительной.

Водный баланс имеет большое значение для контроля водохозяйственных расчетов, для исследования режима работы водохранилища и статей баланса — приходных, расходных и аккумуляционных. К последним, кроме разности $V_н - V_к$, относятся и так называемые «временные потери» (водообмен с грунтом, оседание и всплывание льда по берегам и мелководьям), учитываемые в зависимости от начальных и конечных условий опыта (время года, отметки уровня $Z_н$ и $Z_к$ и т. п.). Данные таких наблюдений очень ценны и должны быть опорными при проектировании и эксплуатации водохранилищ.

При определении фильтрации из водохранилищ необходимо опираться на результаты гидрогеологических исследований и расчетов. Некоторые соображения о расчетах подземной фильтрации из водохранилищ приводятся в работах Шипенко [143], Биндемана [15], Нифантова, Замарина и др.

Для менее ответственных случаев величина фильтрации при проектировании должна учитываться по аналогии с существующими водохранилищами, находящимися в сходных гидрогеологических условиях. За неимением аналогов потери иногда назначаются по сугубо приближенным нормативам, известным в литературе [74, 91].

I. В процентах от наличного объема воды в водохранилище: 1) при хороших гидрогеологических условиях (водонепроницаемые породы, высокие уровни грунтовых вод на склонах и пр.) от 5 до 10% в год, или 0,5—1% в месяц; 2) при средних гидрогеологических условиях 10—20% в год, или 1—1,5% в месяц; 3) при плохих гидрогеологических условиях (водопроницаемые, неводоносные породы и пр.) 20—40% в год, или 1,5—3% в месяц.

II. В виде слоя воды с наличной площади зеркала водоема: 1) при хороших условиях 0,5 м в год, или 1—2 мм в сутки; 2) при средних условиях 0,5—1,0 м в год, или 2—3 мм в сутки; 3) при плохих условиях 1,0—2,0 м в год, или 3—4 мм в сутки.

При расчете полезной отдачи водоема потери на фильтрацию учитываются сразу за год при некотором осредненном наполнении водохранилища (см. § 14) или же при более детальных расчетах — соответственно колебанию наполнений по месяцам и сезонам.

При расположении водозабора ниже плотины, на некотором расстоянии от нее, безвозвратные потери на фильтрацию не учитываются (или только частично учитываются), так как фильтрующая в нижний бьеф вода дополняет полезную отдачу такого водохранилища. В подобных случаях даже значительная фильтрация (в допустимых по условию сохранности сооружений пределах), опасений не представляет.

Если водозабор расположен выше плотины, то для данного водопользователя фильтрация является безвозвратной потерей; для ниже расположенных водохранилищ или водопользователей фильтрация из верхового водохранилища должна учитываться как приходный компонент водного баланса, за исключением той ее части, которая представляет собой утечку за пределы речной долины.

При расчетах показателей регулирования стока по ряду вариантов НПГ, в особенности при наличии каскада водохранилищ, недостаточно обоснованное назначение безвозвратных потерь на фильтрацию может привести к несопоставимости результатов расчета по вариантам. Поэтому выбор схемы учета потерь на фильтрацию должен быть обоснован по каждому водохранилищу (например, по соотношению средних глубин, площадей живых сечений в створе плотины при разных НПГ, путем сравнения величин потерь, исчисляемых от объема и по высоте слоя, и т. п.).

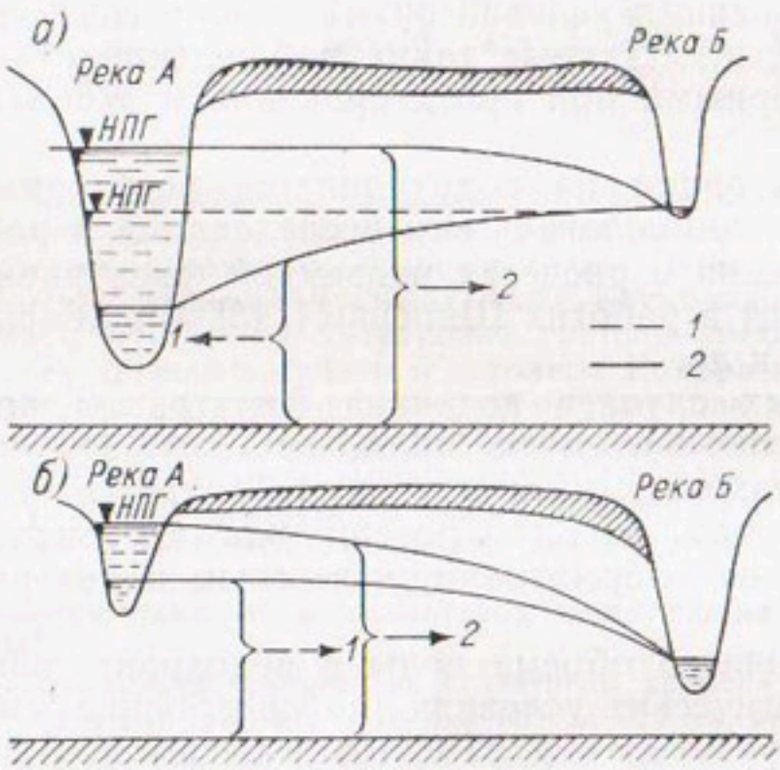


Рис. 20. Поперечные разрезы по междуречному массиву.

1 — направление течения грунтовых вод до устройства водохранилища, *2* — после создания подпора.

В случаях утечки воды в соседний тальвег следует различать непосредственную утечку и потерю воды как разность между грунтовым притоком до и после постройки водоема.

Для водного баланса водохранилища имеет значение потеря воды, что и учитывается в водохозяйственных расчетах.

Рассмотрим такой пример [15]. Грунтовые воды междуречья образуются за счет атмосферных осадков, а расходуются на питание рек *А* и *Б* (рис. 20). Пусть на реке *А* в створе намечаемой плотины расход воды равен 10 м³/с и складывается из поверхностного и грунтового стока. При этом в пределах влияния водохранилища грунтовый приток из междуречья составляет 2 м³/с. Если отметка подпора в долине реки *А* будет выше подземного водораздела (или уровня воды в соседнем тальвеге при отсутствии такого водораздела), то направление грунтового потока изменится на противоположное и появится утечка воды в долину реки *Б* с расходом, допустим, 1 м³/с. В таком случае водохранилище не только утратит прежний грунтовый приток (2 м³/с), но и вызовет утечку воды в соседний тальвег. При этом, учитывая поступление в водохранилище прежнего естественного речного притока

(10 м³/с), следует учесть фильтрационные потери в размере 2+1=3 м³/с, а не 1 м³/с, т. е. 30%, а не 10% расхода реки.

Могут быть и другие соотношения между утечками и потерями при подземной связи стока соседних рек. Например, междуречный массив не имеет водораздела грунтовых вод (инфильтрации осадков нет), но река *А* в естественных условиях имела грунтовый приток от соседней реки, а после сооружения плотины утратила его (рис. 20 *а*). При НПГ водоема, совпадающем с уровнем воды в реке *Б*, утечка отсутствует, но фильтрационные потери при этом равны утраченному грунтовому притоку. При подпоре выше поверхности реки *Б* появится утечка и фильтрационные потери соответственно увеличатся. С опусканием уровня ниже пунктира начнется фильтрация из реки *Б*, тем большая, чем ниже уровень подпора.

Если из реки *А* и до создания водохранилища происходила утечка в реку *Б*, (рис. 20 *б*), то после подъема уровня утечка, понятно, увеличится. В этом случае потери из водохранилища равны разности утечек после и до создания подпора.

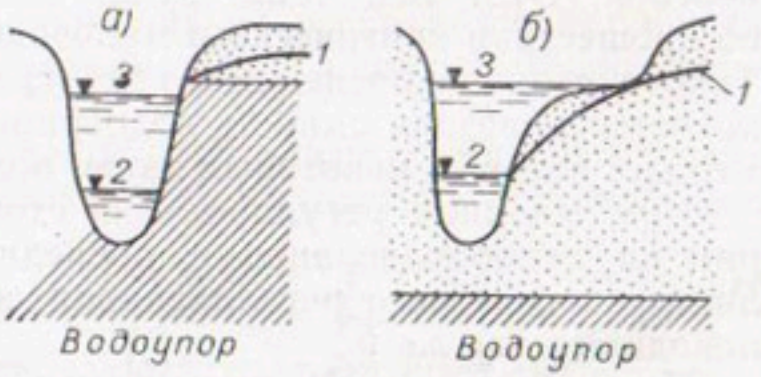


Рис. 21. Случаи подпора, не вызывающего повышения грунтовых вод.

1 — уровень грунтовых вод, *2* — уровень воды в реке до подпора, *3* — уровень воды в водохранилище.

В случаях когда по геологическим условиям исключается связь грунтовых вод с водохранилищем (рис. 21 *а*), или когда по условиям рельефа береговой полосы урез воды после подпора остается близким к уровню грунтовых вод (рис. 21 *б*), повышения последнего не происходит.

Отмеченные случаи потери воды в результате подземной гидравлической связи соседних рек следует добавить к обычным фильтрационным потерям воды из водоема через створ гидроузла и его сооружения.

Потери на ледообразование

Ледяной покров в пределах водной поверхности водохранилища не является потерей воды, так как лед своим весом вытесняет воду и не влияет на напор. Необходимо лишь, чтобы водозаборные устройства размещались под нижней поверхностью льда. Но если процесс ледообразования происходит при одновременной сработке водохранилища (как обычно и бывает в условиях работы водоема на покрытие водопотребления), то та часть воды, которая содержится в объеме льда, осевшего на берегах, временно до весны, исключается из водного баланса.

Однако вода в объеме осевшего по берегам льда далеко не всегда является потерей. С наступлением весны почти вся она

возвращается в водохранилище. Значит, на этот объем уменьшаются зимние водные ресурсы, а весенние соответственно увеличиваются за счет всплывания и таяния льда.

При многолетнем регулировании, например во все годы, пока водоем остается к весне не сработанным до ГМО, оседание льда по берегам при зимней сработке водоема не может вызвать перебоя водоотдачи. Временно, до ближайшей весны, может быть использован наличный запас воды вместо той, которая задерживается на берегах в виде льда. Объемы льда, осевшего на берегах, являются потерей лишь в последний год сработки, заканчивающийся полным исчерпанием полезной емкости водохранилища.

В таком случае недостаток воды в объеме льда на берегах является причиной перебоя или увеличивает продолжительность перебоя. Этот лед тоже будет возвращен в водоем, но лишь по прошествии критического маловодья в последнем году сработки. Таково отличие последнего года сработки, когда полностью расходуется полезная емкость водохранилища, от других лет, к концу межени которых некоторый запас воды сохраняется.

При сезонном регулировании стока потери, аналогичные потерям на ледообразование в последнем году сработки водохранилища многолетнего регулирования, наблюдаются в расчетном маловодном году.

Потери воды (в м^3), вызываемые оседанием льда на берегах, могут быть определены по формуле

$$\Delta V_л = 0{,}9 h_л (F_н - F_к),$$

где $h_л$ — средняя толщина льда за период оседания его на берегах, м; $F_н$ — площадь водохранилища к началу зимы последнего года сработки, м^2; $F_к$ — конечная площадь, или площадь при горизонте мертвого объема, м^2.

При многолетнем регулировании стока годовая полезная отдача уменьшится на величину

$$\Delta V'_л = \frac{\Delta V_л}{n + t},$$

где n — число лет сработки многолетней емкости водохранилища (при сезонном или годичном регулировании $n=0$); t — продолжительность низкого стока в долях года, принятая при расчете сезонной емкости. За неимением данных о величине $h_л$ ее принимают равной 0,67 $h_{л.\,макс}$.

Следует отметить, что временное задержание объема льда $\Delta V_л$ на берегах понижает уровень водохранилища не только в последнем году периода сработки, но и во все зимы, т. е. и при сезонном регулировании. В водохранилищах ГЭС снижение уровня отражается на напоре и ведет к снижению выработки энергии, так как для восстановления напора требуется изъять из притока объем воды, равный $\Delta V_л$. Весной же лед, осевший по берегам, или вода в его объеме нередко сбрасываются.

Временные потери на ледообразование зависят от размеров мелководных площадей (в зоне ежегодной сработки от начала зимы до конца ее), на которых обсыхает лед. Для Рыбинского водохранилища эти потери составляют 10—15% притока за зимние месяцы.

Толщина ледяного покрова в течение зимы определяется по гидрометрическим данным для водоемов этого района. В случае отсутствия таких данных толщину льда приближенно находят по эмпирическим формулам (например, по формуле Ф. И. Быдина).

Как правило, этот вид потерь невелик, а в условиях южных, «гнилых» зим он обычно не учитывается.

Борьба с потерями воды из водохранилищ

В проекте каждого водохранилища не оставляется без внимания вопрос о необходимых и рациональных мерах по уменьшению потерь воды.

Борьба с потерями на испарение необходима во многих случаях, особенно для районов юго-востока ЕТС, Казахстана, Средней Азии

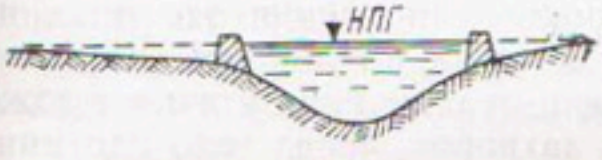


Рис. 22. Обвалование водохранилища.

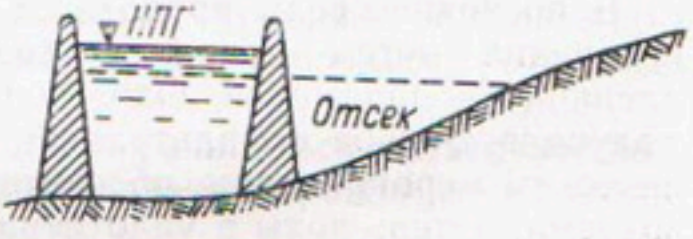


Рис. 23. Водохранилище с отсеком.

и Закавказья. Снижение этого вида потерь достигается сокращением мелководных участков водного зеркала. Мелководья при большом их прогревании наиболее интенсивно теряют воду на испарение, хотя для емкости водохранилища они не имеют существенного значения. Поэтому иногда целесообразно исключить мелководья путем снижения подпора или отделения их от водохранилища. Отделение мелководий достигается путем устройства дамб обвалования (рис. 22) и сооружения водохранилища с отсеком (рис. 23).

В последние годы обвалование применяется довольно часто. Однако в большинстве случаев это мероприятие внедряется не столько для сокращения потерь, а как средство против затопления и подтопления полезных ископаемых, земельных угодий и сооружений [2].

В довольно больших объемах обвалование применялось, например, по водохранилищам на Волге и Днепре.

Идея водохранилища с отсеком заключается в том, что наиболее мелководная верхняя часть водохранилища изолируется от основной ее части плотиной [76]. К наступлению жаркого времени в основное водохранилище перекачивается объем отсека, а затем и последующий приток, по мере его поступления. Так как емкость

основного водоема должна быть равна объему всего водохранилища, то обе плотины соответственно повышаются.

Рассматривать вариант устройства отсека на основной реке (или в пределах больших заливов-отвершков водохранилищ по притокам) следует лишь в случаях значительных потерь на испарение, если при этом отсекаемые площади достаточно велики и мелководны, а площадь основного водоема возрастает при перекачке несущественно. Снижение потерь при этом достигается уменьшением испаряющей площади.

Согласно исследованиям [76], устройство отсеков по водохранилищам Донбасса оказалось неэффективным. В практике известен лишь один пример водохранилища с отсеком для водоснабжения Кураховской ГРЭС (Западный Донбасс). Однако перекачка воды на нем не соблюдалась.

Чаще отсеки возникают как результат обвалования. Так, например, устье р. Базавлук отделено от Каховского водохранилища земляной плотиной, а приток весной (и в иные сезоны) интенсивно перекачивается, чем исключается подтопление предприятий, поселков и угодий.

В последние годы проводятся опыты по борьбе с потерями на испарение путем покрытия водохранилища мономолекулярной пленкой из полимеров. Однако широкого внедрения это пока не получило. Борьба с фильтрацией сводится к различным гидротехническим мероприятиям, обеспечивающим снижение утечки в ложе водоема, потерь воды в уплотнениях затворов, через тело плотины, в обход ее и под ее основание.

Борьба с потерями на фильтрацию через нескальные горные породы, в которых вмещается чаша водохранилища, ведется следующими средствами (некоторые из них применяются также для создания водонепроницаемости ирригационных каналов):

а) покрытие ложа водоема плотной одеждой — бетоном, глинобетоном, асфальтом и т. п.;

б) покрытие ложа хлор-виниловой пленкой с засыпкой ее рыхлым грунтом слоем 40—60 см;

в) кольматаж грунта путем искусственного увеличения мутности поступающей воды;

г) осолонение поверхности грунта технической поваренной солью для создания уплотняющих коллоидов в грунте;

д) пропитывание верхнего слоя грунта растворами дубильных веществ и железного купороса, образующих в порах грунта водонепроницаемую пленку.

Указанные меры борьбы с фильтрацией трудоемкие и дорогостоящие, а потому могут применяться лишь для небольших водоемов.

Трещины или карстовые пустоты в породах, образующих чашу водохранилища, заполняются посредством цементации.

Устранение фильтрации в обход подпорных сооружений и под их основанием достигается устройством шпунтовых стенок, цементационных и мерзлотных завес и т. д.

Борьба с потерями на ледообразование не проводится. Однако в ряде случаев целесообразно упорядочить русла рек, питающих водохранилище, расчистить перекаты, образующие зажоры, ликвидировать второстепенные рукава и организовать поток по одному основному руслу и т. п. В противном случае при наступлении ледостава на реках образуется подпор, перекаты забиваются губчатым льдом, появляются наледи, вода растекается на берега, и питание водоема прекращается. Это может быть причиной тяжелых последствий, если к зиме водоем был значительно сработан. Недопущение таких явлений очень важно для малых водохранилищ, являющихся иногда основными источниками водоснабжения населенных пунктов, железнодорожных станций, ГРЭС и предприятий.

Если вода забирается из нижнего бьефа на значительном расстоянии от водоема и обеспечивается попусками из него, то на транзитном участке русла зимой возможны потери воды, особенно при периодических попусках. Для уменьшения потерь этот участок русла также должен быть упорядочен, а режим попусков следует установить с учетом эксплуатационных данных по другим объектам и местных гидрометеорологических условий, позволяющих рассчитать протяженность участка русла, свободного ото льда при попусках [58].

Принятый режим попусков должен начинаться с наступлением ледостава и поддерживаться до конца зимнего режима.

Грунтовые водоемы

Если подземные воды питают реку, как это обычно и наблюдается, то их уровень расположен выше поверхности реки в бытовом ее состоянии. Но подпорные уровни водоема почти всегда выше естественного уровня подземных вод в прибрежной зоне. Поэтому устройство водохранилища обычно влечет за собой изменение их режима. При повышении уровня водохранилища по мере его наполнения повышается и уровень грунтовых вод, с чем, как отмечалось выше, связана временная утечка воды из водохранилища на насыщение пород, слагающих его ложе. При понижении уровня воды в нем происходит обратное явление — возврат воды из грунта.

Таким образом, грунты ложа водохранилища и его берегов, способные впитывать и сохранять воду, играют роль грунтового водоема. Он размещается в пределах пространственных клиньев грунтовой емкости между естественным и подпорным уровнями подземных вод по обоим берегам водохранилища (см. рис. 19). Наибольшая высота клиньев находится у плотины, наименьшая (нуль) — в противоположном конце водоема, а общий объем их определяется по гидрогеологическим поперечникам.

В пределах грунтовой емкости можно также различать рабочий и мертвый объемы.

При первичном наполнении водохранилища до ГМО насыщается и мертвый объем в грунте. Связанные с этим потери воды являются безвозвратными. При наполнении и сработке водохранилища то же самое будет происходить и в рабочей части грунтового водоема, совершающего временный водообмен с наземной емкостью при изменении ее уровня. За счет этого несколько увеличивается регулирующий объем водохранилища, т. е. появляется резерв для повышения полезной отдачи, если при НПГ грунтовый поток, как и в естественных условиях, сохраняет уклон к реке.

В. А. Бахтиаров [12] приводит следующие данные о грунтовой емкости Цимлянского водохранилища при его заполнении в 1952 г. (табл. 19). Расчетное насыщение W определялось по формуле В. Г. Андреянова

$$W=(1-e^{-t^n})\,V, \qquad (21)$$

где V — грунтовая емкость до отметки уровня воды в водохранилище; t — время впитывания от начала наполнения; n — показатель степени для t; e — основание натуральных логарифмов.

Таблица 19

Объем воды, ушедшей на насыщение чаши водохранилища

Месяц	Грунтовая емкость, км³	Насыщение, км³	
		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

По фактическим данным о насыщении грунтовой емкости и при учете времени t в месяцах значение n в этом примере оказалось равным 0,5.

Эта формула дает суммарное, постепенно затухающее насыщение грунта за t месяцев с начала насыщения.

В июне 1952 г. полная рабочая емкость водохранилища составила 13,36 км³, в том числе грунтовая емкость 2,03 км³, или 15%.

Таким образом, при известных условиях появляется возможность регулировать режим подземных вод. При этом одним из приемов дополнительного накопления и сохранения водных ресурсов для хозяйственных и бытовых нужд является искусственное пополнение подземных вод [127], создание грунтовых водоемов. Это достигается:

а) заполнением водой пойменных озер и стариц, устройством фильтрующих водоемов в понижениях рельефа, заполняемых осадками с водосбора или стоком, поступающим сюда из реки или водохранилища самотеком или путем перекачки;

б) затоплением площадей залегания фильтрующих пород;

в) закачкой речного стока в подземные горизонты через скважины и поглощающие колодцы;

г) созданием ряда фильтрационных каналов, распределяющих воду из реки или пруда по поверхности водопроницаемого грунта;

д) рыхлением речного русла, если оно со временем кольматируется и снижает подпитку подземных горизонтов, и другими приемами.

Искусственное пополнение подземных вод нашло широкое применение в США, Канаде и других странах. В ФРГ в пойме р. Рур параллельно руслу реки создан ряд фильтрационных бассейнов шириной 10—30 м, длиной 250—400 м и глубиной до 3 м. Расположены они через 40—45 м и пополняют подземные воды. В 50 м от линии бассейнов уложены дренажные трубы, которыми вода собирается в резервуар к насосной станции и подается для водоснабжения г. Эссен. В г. Магдебурге на р. Эльбе (ГДР) создано грунтовое водохранилище в толще песков, заполняющих чашеобразное понижение водоупорного пласта глины. Пополнение грунтового водохранилища происходит из фильтрационного бассейна, а водозабор устроен из колодцев глубиной 60—90 м, расположенных примерно в 3 км от бассейна.

В нашей стране широкого применения грунтовые водохранилища еще не получили. Известно, например, использование такого водоема для водоснабжения г. Арзамаса; производится обогащение подземного водоносного горизонта в г. Ивано-Франковске. Имеются простейшие грунтовые водохранилища в Туркмении. Чаще просто усиливают непосредственное естественное питание из реки подземных вод, используемых затем для водоснабжения (г. Воронеж).

В ряде случаев созданием и использованием грунтовых водоемов достигается улучшение качества воды, повышается меженный сток в реках, сохраняются водные ресурсы от бесполезного сброса их в море.

Однако целесообразность и возможность искусственного пополнения и надежность использования подземных вод зависят от почвенных, гидрогеологических, топографических и экономических показателей, а также от степени совершенства технических решений.

Как отрицательное явление, весьма обильное пополнение подземных вод с приближением их поверхности к уровню почвы часто наблюдается по трассам магистральных каналов (Каракумского им. В. И. Ленина, Южно-Украинского и др.) и на орошаемых массивах Киргизии, Туркмении, Северного Кавказа, Закавказья и Украины. В ряде случаев это приводит к превращению почв в солонцы и солончаки. Исключение таких явлений достигается устройством дренажа для сбора и отвода или перекачки избыточного фильтрата.

Сведения о подземных водах, их регулировании и влиянии на речной сток освещены в работах [63, 88, 89, 90, 127, 128 и др.].

Глава IV

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА РАСЧЕТЫ ПО КАЛЕНДАРНЫМ ВЕЛИЧИНАМ СТОКА НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ВОДООТДАЧИ

§ 9. ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА. ПОКАЗАТЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ И МЕТОДЫ ЕГО РАСЧЕТОВ

Выполняемое при помощи водохранилищ регулирование речного стока изменяет его естественный режим для наиболее рационального использования водных ресурсов в народном хозяйстве.

Регулированием стока решаются две основные задачи:

1) повышение низких расходов воды для надежного водо- или энергоснабжения населения и предприятий. Такое регулирование является обычным, когда ставится задача использования стока, недостаточного в межень и избыточного в половодье и паводки;

2) понижение высоких расходов для устранения наводнений на участке реки ниже гидроузла или для сокращения размеров и удешевления водосбросных сооружений.

Обе эти основные задачи нередко оказываются противоречивыми: не зная заранее величины высокого стока и времени его прохождения, требуется держать водохранилище пустым, а для повышения низкого стока — наполненным. В таком случае преимущество отдается главному водохозяйственному мероприятию, а второстепенная задача решается частично и с учетом проектных условий работы установки по основному водохозяйственному плану.

Если важная, хотя и второстепенная, задача незначительно влияет на экономические показатели решения основной задачи, то оба мероприятия решаются в полной мере. Так, чтобы регулировать сток р. Саксагани с целью защиты Криворожских рудников от затопления, необходимы были весьма большие объемы водохранилищ для аккумуляции высокого стока. Поскольку регулирование стока для водоснабжения поселка требовало при этом сравнительно небольших дополнительных объемов, то обе потребности удовлетворены полностью.

В особо сложных случаях оптимальное решение принимается в результате анализа ряда вариантов по комбинациям элементов обеих задач.

Для удобства изложения вначале рассмотрим вопросы повышения низких расходов, регулирование высокого стока будет рассмотрено в гл. XIII.

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

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

При отсутствии гидрометрического ряда обеспеченные минимумы стока (среднесуточные и среднемесячные) устанавливаются по данным региональных обобщений [23, 121].

Выявив потребность регулирования, находят его продолжительность опять-таки из сравнения водопотребления и стока в маловодье за сутки, неделю, сезон, год и т. д.

Регулирование стока на повышение низких расходов выполняется путем временного задержания в водоеме избытков стока над потреблением (в многоводные сезоны или годы), которые затем срабатываются во время маловодья, когда приток меньше потребления.

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

Виды регулирования стока

Различают следующие виды регулирования: суточное, недельное, сезонное (или годовое) и многолетнее. Встречаются также компенсирующее и так называемое вторичное, или буферное, и непериодическое регулирование.

Суточное регулирование состоит в перераспределении по часам суток практически равномерного суточного стока Q соответственно неравномерному водопотреблению. В часы малого потребления вода накапливается в резервуаре, а в часы пик расходуется из него соответственно неравномерности водопотребления (см. рис. 4).

Суточное регулирование позволяет уменьшить пропускную способность водозаборного сооружения, насосной станции и водовода (или канала), обеспечивающих равномерную доставку воды в бассейн суточного регулирования. При отсутствии этого бассейна пришлось бы все упомянутые сооружения рассчитывать на максимальный часовой расход воды (см. рис. 4) и неравномерную подачу ее непосредственно водопотребителям (в водоразборную

сеть). Суточное регулирование имеет большое значение и в гидроэнергетике для повышения использования мощности ГЭС (см. § 33).

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

Если потребление воды в рабочие дни q_1, а в нерабочий день — q_2, то при продолжительности недели (декады) n дней, в числе которых имеется k нерабочих дней, общее потребление воды за это время составит (рис. 24)

$$[q_1(n-k)+q_2k]\,86\,400 \text{ м}^3,$$

а среднее водопотребление (в м³/с), равное стоку, можно представить так:

$$q_{ср}=Q=\frac{q_1(n-k)+q_2k}{n}. \qquad (22)$$

Из формулы (22) видно, что за счет разницы в нерабочие дни $q_{ср}-q_2$ среднесуточный расход в рабочие дни может быть повышен до величины

$$q_1=q_{ср}+\frac{(q_{ср}-q_2)\,k}{n-k}. \qquad (22')$$

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

$$V_1=(q_1-q_{ср})(n-k)\,86\,400 \qquad (23)$$

равно избытку ее в нерабочие дни

$$V_2=(q_{ср}-q_2)\,k\,86\,400. \qquad (24)$$

Подставляя значение $q_{ср}$ из формулы (22) в одну из двух последних формул, найдем необходимую емкость недельного регулирования

$$V=V_1=V_2=k(q_1-q_2)\,\frac{n-k}{n}\,86\,400 \text{ м}^3. \qquad (25)$$

Сезонное (годовое) регулирование состоит в перераспределении стока из многоводных сезонов на маловодные. Водопотребление каждого года удовлетворяется стоком этого же года. Такое регулирование обусловлено внутригодовой неравномерностью стока и несовпадением величины стока и водопотребления во времени.

В тех случаях, когда обеспеченный объем годового стока $Г_р$ больше водопотребления брутто (вместе с потерями воды) за год $A_{бр}$ или равен ему ($Г_р \geqslant A_{бр}$), причем в отдельные периоды

года сток меньше водопотребления, возникает необходимость внутригодового или сезонного регулирования стока до величины необходимого зарегулированного расхода Q. Если таким периодом является вся межень, этот вид регулирования называют также годовым. Полное годовое регулирование удовлетворяет получению гарантированного объема водопотребления, равного обеспеченному объему годового стока: $A_{бр}=Г_р$. Если $A_{бр}$ приближается к $Г_р$, имеет место глубокое сезонное или неполное годовое регулирование. При этом водохранилище заполняется практически во все годы в пределах заданной обеспеченности, в расчетном году весной имеются сбросы воды, обеспеченность заполнения водохранилища обычно больше обеспеченности потребления. Малые соотношения $A_{бр}:Г_р$ свойственны случаям неглубокого сезонного регулирования.

На рис. 25 показаны гидрографы естественного стока расчетного маловодного года (*а*) и зарегулированных расходов для простейшего случая равномерного водопотребления (*б*).

В период избытков стока над потреблением водоем наполняется, в периоды недостатков — срабатывается. Его емкость, необходимая для сезонного регулирования, равна дефициту стока (на рис. 25 заштрихованная часть), т. е. разности объемов потребления и притока за время его недостаточности.

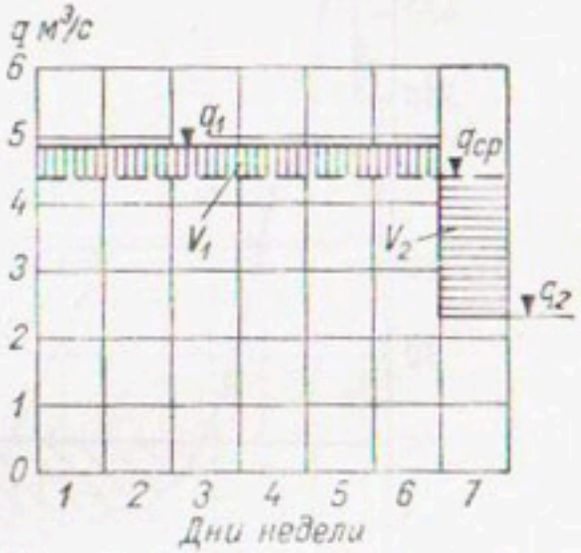


Рис. 24. Схема недельного регулирования стока.

Если зарегулированный расход меньше среднего расхода расчетного маловодного года, то избытки стока больше дефицита, и часть стока после наполнения водохранилища сбрасывается.

Рассмотренный пример представляет простой случай однотактной работы водохранилища: в течение водохозяйственного года оно по одному разу наполняется и срабатывается. При сложном гидрографе притока (при наличии летне-осенних паводков) водохранилище работает в два такта и более.

В практике встречаются два типа сезонного регулирования [61]. Первый тип относится к случаям, когда $A_{бр}<Г_р$. При этом водохранилище ежегодно в половодье наполняется до предела (со сбросами), а в период межени срабатывается. Такова схема регулирования стока небольшим водохранилищем для промышленного и коммунального водоснабжения. По второму типу водохранилище даже значительных размеров, могущее выполнять многолетнее регулирование, эксплуатируется с полной сработкой к концу периода низкого стока во все годы, даже весьма многоводные. Таковы водохранилища, поддерживающие попусками судоходные глубины: Вышневолоцкое, Верхневолжский бейшлот, Кубенское озеро и др. Эти водоемы полностью срабатываются к концу

навигации. Весной они различно, иногда недостаточно наполняются (соответственно стоку половодья) и имеют переменную по годам отдачу.

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

В связи с возможностью перехода от одного вида регулирования к другому отметим следующее.

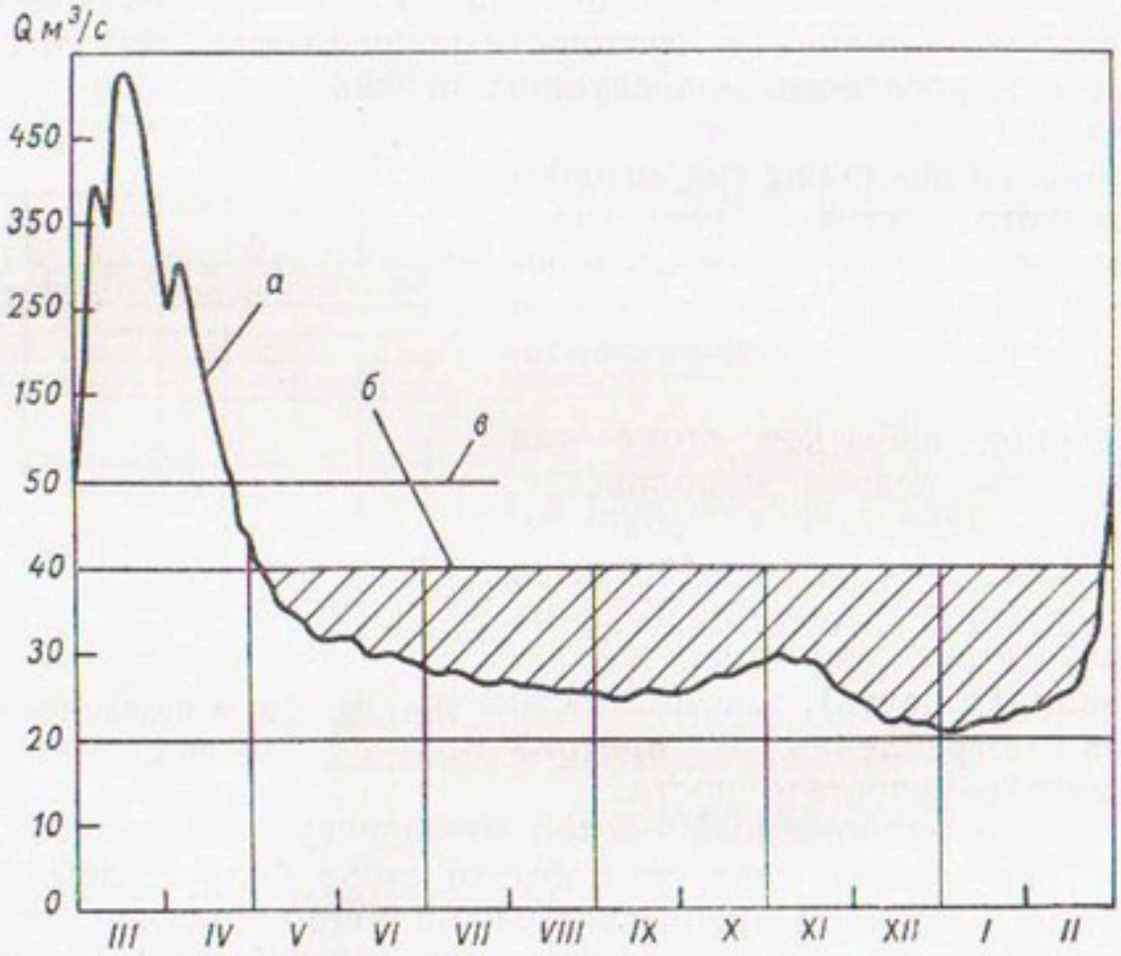


Рис. 25. Схема сезонного регулирования стока.

а — естественные расходы, *б* — зарегулированные расходы, *в* — линия изменения масштаба.

Хотя длительность или период сработки водохранилища находится в достаточно тесной связи с видом регулирования, потому и получившего название сезонного или многолетнего, тем не менее для каждого данного водохранилища период регулирования неустойчив. Поэтому существующее в практике деление видов регулирования на сезонное и многолетнее является в известном смысле условным.

Как объясняют С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61], все случаи регулирования можно отнести к многолетнему, если иметь в виду и весьма редко появляющиеся колебания стока. В самом деле, мыслимо такое распределение стока в году, когда даже при не очень глубоком сезонном регулировании на постоянную отдачу

емкость не будет сработана в межень или не будет заполнена в период одного половодья, что свойственно многолетнему регулированию. И, наоборот, при многолетнем регулировании, хотя и не очень глубоком, бывают случаи полной сработки водоема за одну очень маловодную межень с заполнением водоема в ближайшее половодье, что свойственно сезонному регулированию.

Сезонное регулирование на переменную по годам отдачу водоема, ежегодно опорожняемого для попусков в межень, также может стать многолетним при весьма многоводной межени, когда водоспуск не в состоянии пропустить приток и опорожнить водохранилище. Значит одна и та же емкость может в одних случаях быть только сезонным регулятором стока, а в других — перераспределять сток между годами.

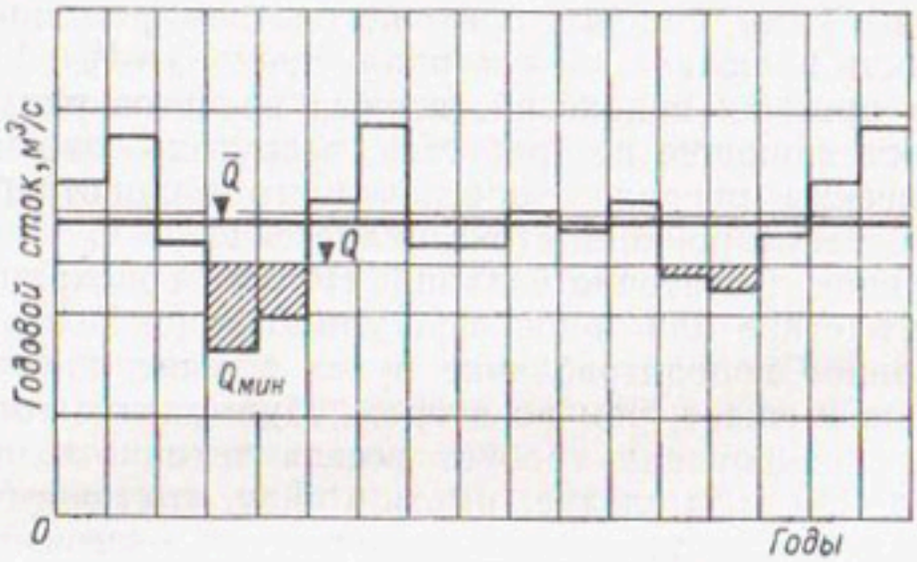


Рис. 26. Схема многолетнего регулирования стока.

Таким образом, с учетом возможных в будущем колебаний стока грань между упомянутыми видами регулирования в некоторой мере стирается. В строгом смысле относить регулирование стока данным водохранилищем к тому или иному виду можно лишь применительно к известному ходу стока в конкретный период.

На практике за критерий, по которому определяется вид регулирования, обычно принимают соотношение между отдачей $A_{бр}$ и годовым стоком расчетной обеспеченности $Г_р$: при $A_{бр}<Г_р$ или $A_{бр}>Г_р$ регулирование считается соответственно сезонным или многолетним.

Методика расчетов сезонного регулирования изложена в § 12.

Многолетнее регулирование стока. При величине гарантируемого водопотребления больше обеспеченного объема годового стока ($A_{бр}>Г_р$) требуется перераспределение с помощью водохранилища части стока из многоводных лет на маловодные. Дефицит стока за маловодное n-летие (на рис. 26 заштрихованная часть) покрывается из запасов воды, накопленных в водоеме за многоводный период, предшествовавший маловодью.

В отличие от сезонного регулирования, в котором цикл работы водоема наполнение — сработка замыкается в пределах одного года, при многолетнем регулировании этот цикл длится несколько лет. Практический интерес представляют в отдельности продолжительность наполнения и сработки (см. § 14). Чем больше глубина регулирования, т. е. чем ближе годовое водопотребление $A_{бр}$ к среднему годовому стоку $Г_0$, тем длительнее период наполнения и сработки, тем необходимее бóльшая емкость водохранилища, которая резко возрастает с увеличением соотношения $A_{бр}:Г_0$.

При многолетнем регулировании стока всегда емкость больше, чем при годовом, так как, кроме объема для внутригодового регулирования, или сезонной составляющей емкости водохранилища $V_с$, необходима также многолетняя составляющая емкости $V_м$ для накопления стока многоводных лет с целью использования его в маловодные годы. Значит, при многолетнем регулировании полезная емкость включает две составляющие: $V_п = V_с + V_м$.

В одних приемах водохозяйственных расчетов разделения емкости на составляющие не требуется, в других — оно необходимо.

Теоретическим пределом обеспеченного водопотребления при многолетнем регулировании стока является $A_{бр} = Г_0$.

При наличии достаточно большой емкости водохранилища возможно многолетнее или годовое регулирование. В первом случае гарантированное водопотребление будет больше, а среднегодовое за многолетие меньше, чем во втором. Применение того или другого вида регулирования требует всегда технико-экономического обоснования, при этом следует иметь в виду, что преимущества годового регулирования возможны лишь при освоении избытков воды над гарантированным потреблением.

Методика расчета многолетнего регулирования стока приведена в гл. V.

Компенсирующее регулирование. Если пункт водозабора или водопользования расположен по реке ниже водохранилища, причем на участке между ними имеется существенный нерегулируемый сток, то водохранилище проектируется на обеспеченное покрытие дефицита между годовым графиком водопотребления и расчетным гидрографом стока с незарегулированного участка. В этом случае водохранилище должно так зарегулировать проходящий через него сток, чтобы с учетом нерегулируемого промежуточного притока, поступающего в реку ниже водохранилища, получить необходимый режим расходов в пункте водозабора (см. гл. XI).

Вторичное (или повторное) регулирование стока — так можно назвать вид регулирования, который вызывается в основном не режимом стока, а режимом регулирования на выше лежащей водохозяйственной установке, не удовлетворяющим требованиям потребителей воды, расположенных ниже. Так, например, ГЭС, регулирующая сток на покрытие зимнего максимума нагрузки, может не удовлетворять (по годовому ходу турбинных расходов) условиям ниже расположенного оросительного

водопотребления с максимумом в летний период. В таком случае для орошения требуется перерегулирование расходов гидростанции.

С некоторой условностью к тому же виду регулирования можно отнести случай, когда компенсирующее водохранилище не может точно приспособиться к режиму ниже лежащих водопотребителей (например, вследствие затруднительности правильного определения скоростей добегания при переменном наполнении нижнего бьефа и т. п.). При этом требуется дополнительное регулирование расходов водохранилищем у низового водопотребления, которое иногда называется *буферным*.

Непериодическое регулирование [12] отличается тем, что оно не имеет строго заданного водопотребления или графика работы. Сработка и наполнение водохранилища производится по мере надобности и возможности. Этот вид регулирования используется для ряда потребностей водного хозяйства.

В лесосплаве такое регулирование применяется наряду с суточным и сезонным. В отличие от сезонного, при котором лесосплав возможен круглосуточно в пределах всего периода регулирования, при непериодическом (как и при суточном) регулировании сосредоточенный попуск из водохранилища для лесосплава дается в течение нескольких часов; запасы же накапливаются (в отличие от суточного регулирования) на протяжении ряда суток.

Непериодическое регулирование, так же как и суточное, в применении к лесосплаву имеет следующие недостатки: а) ограниченная длина участков действия попусков — не более 30—50 км, а на озеровидных плесах еще меньше; б) большая потеря воды в старицах и заливах; в) усложнение процесса сплава, ухудшение использования рабочего времени, образование заторов из бревен и т. п. Однако при всех недостатках это регулирование благодаря своей простоте выполняется при помощи несложных плотин и получило распространение в лесосплаве.

В водном транспорте сосредоточенные попуски применяются в тех случаях, когда на некоторое время требуется повысить судоходные глубины на перекатах. В санитарных целях такие попуски используются для временного затопления и промывки анофелогенных участков реки, как мера борьбы с очагами малярии. В сельском хозяйстве временными попусками пользуются для затопления пойменных луговых угодий и при лиманном орошении, а в рыбоводстве — для повышения глубин в местах нерестилищ.

Гидравлические расчеты режима нижнего бьефа при попусках, как и при суточном регулировании, изложены в § 33.

Показатели регулирования стока

Расчеты регулирования на повышение низкого стока сводятся к установлению обеспеченной отдачи водохранилища, его объема и режима работы.

Отдачей водохранилища (обеспеченной или гарантированной) называется количество воды, получаемое из него за год при заданных обеспеченности и объеме водохранилища. Отдача определяется в абсолютных величинах, т. е. в м³/год, и в относительных — в долях среднегодового стока. Можно говорить и об отдаче, например, за сезон как о соответствующей доле годовой отдачи. Различается отдача брутто и отдача нетто.

Отдача брутто (или просто отдача) объединяет хозяйственное годовое водопотребление $A_п$ и годовой объем потерь из водохранилища $a_{кр}$ на испарение и фильтрацию (в некоторых случаях также на ледообразование) за критический период, т. е. период полной сработки водоема. Отдача брутто в долях среднегодового стока $Г_0$ называется коэффициентом регулирования стока брутто $\alpha_{бр}$. Отдача $\alpha_{бр}$ имеет своим верхним пределом единицу[1].

Отдача нетто (или полезная отдача) составляет только хозяйственное водопотребление из водохранилища без вышеупомянутых потерь воды из него. Полезная отдача должна удовлетворять гарантируемое водопотребление.

Отдача нетто в долях среднегодового стока называется коэффициентом регулирования стока нетто $\alpha_н$.

Таким образом,

$$\alpha_{бр}=\frac{A_п+a_{кр}}{Г_0}, \quad \alpha_н=\frac{A_п}{Г_0}.$$

Различают также степень использования стока, характеризуемую коэффициентами использования $\eta_{бр}$ и $\eta_н$:

$$\eta_{бр}=\frac{Г_0-C}{Г_0}, \quad \eta_н=\frac{Г_0-a_{ср}-C}{Г_0},$$

где $a_{ср}$ — годовой объем потерь воды из водоема в среднем за многолетие; C — среднегодовой объем холостого сброса.

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

Показатели $\alpha_{бр}$ и $\eta_{бр}$[2] являются основными характеристиками условий регулирования стока, $\alpha_н$ и $\eta_н$ определяют условия обслу-

---

[1] При весьма больших полезных объемах водохранилища $\beta_п$ и сравнительно невысокой обеспеченности отдачи теоретически $\alpha_{бр}$ может быть и несколько более единицы. При этом $\alpha_{бр}>1$ потому, что почти отсутствуют сбросы из водохранилища и экономится вода за годы перебоев [61].

[2] При дальнейшем изложении индекс «брутто» опускается.

живания потребителей воды и энергии: размер полезной отдачи, долю потерь и т. п.

Определение потерь и полезной отдачи при заданной отдаче брутто производится элементарным табличным расчетом в соответствии с режимом работы водохранилища (см. § 14).

Важной характеристикой условий регулирования стока является коэффициент емкости водохранилища $\beta_п = V_п : Г_0$, представляющий отношение полезного объема к среднему объему годового стока. Аналогичные соотношения встречаются при расчетах многолетнего регулирования стока для сезонной и многолетней составляющих емкости, если они определяются раздельно ($\beta_с = V_с : Г_0$, $\beta_м = V_м : Г_0$). С увеличением α, $C_{вг}$ и $P\%$ коэффициент $\beta_п$ закономерно возрастает.

Обычным при регулировании стока является решение прямой и обратной задач.

Определение полезной емкости $V_п$ по заданной величине потребления, т. е. зарегулированного расхода Q или отдачи $A_п$, и режиму работы водохранилища считают прямой задачей регулирования, определение отдачи водохранилища по его заданной емкости и режиму работы — обратной задачей. Наряду с этим дается зависимость $Q = f(V_п)$, которая является результатом регулирования по ряду вариантов емкости и служит для выбора наиболее приемлемого. Для принятого варианта требуется выявить характеристики режима работы водохранилища за многолетний период (ход наполнений, сбросов, отдачи, кривые обеспеченности этих величин и т. п.).

Основные методы расчетов регулирования стока

Установление параметров водохранилища (емкости, отдачи) и режима его работы производится на основе анализа режима речного стока. При этом имеется в виду, что колебания фазово-однородных величин стока носят случайный характер, подчиняющийся определенной закономерности лишь в смысле распределения вероятностей. Только внутригодовой ход стока имеет для большинства рек устойчивую закономерность, отчетливо проявляющуюся в циклической смене фаз по временам года. Эти обстоятельства определяют следующие основные принципы использования гидрометрических материалов при расчетах по регулированию стока.

А. Календарный ход стока на будущий длительный период работы водохранилища не может быть предсказан заранее, можно предвидеть лишь вероятности различных сочетаний стока (гидропрогнозы и гидроинформации, имеющие заблаговременность от нескольких дней до 1—2 месяцев и более, принимаются во внимание как в расчетах, так и при эксплуатации водохозяйственных установок).

Б. Конкретный ряд стока за время наблюдений позволяет получить представление о возможных в будущем особенностях

водохозяйственного режима и о их вероятностях (с учетом замечаний в § 4 об эмпирической обеспеченности).

Исходя из указанных принципов, в существующей теории регулирования стока рассматриваются два основных метода водохозяйственных расчетов:

1) расчет по фактическому ряду стока (в табличной форме или по интегральным кривым стока и водопотребления);

2) обобщенный расчет на основе теории вероятностей с использованием статистических параметров стока.

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

Формально такая система расчета представляется как процесс эмпирического подбора водохозяйственных параметров в точном соответствии с режимом стока за период наблюдений. По существу же смысл такого рода операции заключается в стремлении уловить те особенности гидрологического режима, которые принимаются предположительно как характерные для рассматриваемого водотока и на этом основании распространяются (по аналогии с прошлым) на предстоящий период работы проектируемой установки.

Второй метод расчета требует математического выражения объективных закономерностей колебаний стока, которые проявляются в распределении вероятностей фазово-однородных значений стока, в циклической смене фаз стока, соответствующих временам года, и в стохастической связи между величинами стока за смежные промежутки времени. При математическом выражении упомянутых закономерностей можно перейти к вероятностному предвидению стока за время эксплуатации установки. Соответственно и все водохозяйственные показатели ее работы, являющиеся результатом взаимодействия бытового стока и водохранилища, выражаются в форме вероятностей.

Как ожидаемый режим стока, так и водохозяйственные характеристики установки корректируются во время ее эксплуатации путем использования краткосрочных (и долгосрочных) гидропрогнозов, допускаемых уже в самом проектировании, а также путем учета изменений, вносимых в режим стока хозяйственной деятельностью (см. § 16 и гл. VII).

По второму методу календарный ряд используется для получения статистических параметров стока. С этой же целью привлекаются накопленные в гидрологической литературе обобщения.

Построенные на базе принятых параметров кривые обеспеченности служат для получения вероятных значений стока и их сочетаний. При этом исходным для разработки водохозяйственного плана становится не сам календарный ряд стока, а обобщенные характеристики его режима: а) кривые обеспеченности основных фазово-однородных величин стока (за год, половодье, межень), б) расчетное распределение стока за год и для каждой фазы годового цикла (по гидрометрическим материалам).

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

При глубоком многолетнем регулировании решающее значение в режиме работы водохранилища имеют колебания объемов стока за целые годы и по группам лет. Повторяемость этих величин при исследовании гидрометрического ряда подвергается тщательному анализу, так как циклы сработки и наполнения распространяются на несколько лет, число которых увеличивается с повышением степени регулирования. Для большей надежности расчета водохранилища по гидрометрическому ряду необходимо, чтобы он был достаточно длительным и включал бы группировку маловодных лет, вызывающих полную сработку водохранилища. Основным элементом обобщенного расчета служит в таком случае кривая обеспеченности годовых объемов стока. Режим стока внутри года принимается по схеме расчетного распределения [93, 121].

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

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

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

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

Вся совокупность построенных кривых обеспеченности с нанесенными на них эмпирическими точками — значениями стокового ряда (с указанием года) позволяет обоснованно выбрать характерные годы-модели: многоводный, средний и маловодный, близкие к заданным для них обеспеченностям (см. § 2).

Гидрограф года-модели корректируется путем умножения всех ординат гидрографа на коэффициент, равный отношению объема годового стока заданной обеспеченности к объему стока года-модели. Подобные приводки применяются часто и к отдельным фазам — к расходам межени (см. гл. VII), гидрографам половодий и паводков (см. гл. XIII) и т. п.

В случаях, когда вода (или энергия) потребляются равномерно в течение года или отдельного сезона, а установка работает на незарегулированном стоке, вместо расчетных гидрографов в ряде случаев применяются кривые продолжительности суточных расходов воды [6].

Рассматриваемые приемы расчета имеют свои достоинства и недостатки. Расчет непосредственно по стоку истекшего периода отличается наглядностью и удобством применения к любому сколь угодно сложному водохозяйственному режиму. Недостатками его являются:

1) неопределенность обеспеченности и поэтому несопоставимость результатов водохозяйственных расчетов;

2) невозможность расчета при отсутствии достаточно продолжительных наблюдений за стоком данной реки;

3) невозможность обобщения выводов расчета.

Расчет по обобщенным характеристикам стока реки в основном не имеет указанных недостатков. Однако он может давать убедительные результаты только в сочетании с фактическими данными и при условии, если в нем правильно отражаются указанные выше вероятностные закономерности.

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

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

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

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

Однако, как уже отмечалось в § 4, такое определение необходимой емкости водохранилища могло быть верным только в применении к средней ее величине из нескольких расчетов (например, из ряда 20-летий). Для каждого же отдельного случая (ряда) обеспеченность бесперебойной работы водохранилища, рассчитанного по стоку истекшего периода, значительно колеблется (см. § 10).

Очевидно, чем менее полными являются исходные стоковые данные для обобщенного расчета, тем менее точными будут и его результаты. Расчет непосредственно по недостаточным фактическим данным будет еще более приближенным (или просто невозможным). Кроме того, нельзя забывать трудностей накопления гидрометрических материалов в условиях весьма развитой и крайне разнообразной гидрографической сети на необъятных пространствах нашей страны с различными климатическими зонами и многочисленными типами режима рек. Поэтому при отсутствии стоковых рядов для большинства малых, а иногда и для средних рек обобщенный метод расчета приобретает особо важное значение, давая возможность использовать региональные обобщения характеристик стока и такие же параметры, найденные по коротким рядам [1].

Статистические параметры, основанные на стоковых рядах, одинаковых по длительности, но разных по хронологии, а также при разной их длительности, приводят к несравненно более устойчивым результатам обобщенных водохозяйственных расчетов, чем расчеты по соответствующим рядам стока [61, 77].

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

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

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

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

Вероятностный метод расчета по статистическим параметрам того же ряда рассматривает все возможные сочетания величин

---

[1] Во избежание влияния непрезентативности короткого ряда годовых величин стока учитывается его положение в циклическом ходе стока [7, 8, 21, 121].

стока (с учетом отсутствующих, но возможных в данном ряду), исследует эти величины как свободно варьирующие (в смысле их размеров и последовательности) соответственно обобщенным параметрам. Этим самым исключаются влияния случайных особенностей периода гидрометрических наблюдений.

Указанные условия и особенности расчетов по вероятностному методу способствовали широкому его распространению не только при ограниченных сведениях о стоке, но и наряду с расчетами по фактическим длительным рядам и для контроля даваемых ими результатов.

Однако этот метод не дает наглядной характеристики режима работы установки. Искомые водохозяйственные показатели определяются путем математических построений, причем в сложных условиях водохозяйственных расчетов встречаются затруднения. Поэтому во всех случаях водохозяйственного проектирования в различных комбинациях используются элементы обоих методов расчета.

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

Развитие методики водохозяйственных расчетов

Изложим кратко историю развития методов расчета регулирования стока.

Почти до конца XIX в. таких методов в современном смысле не было. В оценке режима водохозяйственных установок господствовал примитивный эмпирический подход. Будущий режим их эксплуатации принимался целиком по гидрологическим условиям истекшего периода, освещенного гидрометрическими измерениями, обычно непродолжительными. Расчеты выполнялись в виде сопоставления в хронологическом порядке расходов притока в водохранилище и расходов потребления, причем вычислялись избытки и недостатки воды. Так возникли методы балансовых расчетов — аналитических (табличных) и графических, которые совершенствуются еще и теперь. В 1912 г. этому вопросу была посвящена одна из работ Н. В. Мастицкого: «Графический способ определения оросительной способности рек» («Известия собрания инженеров путей сообщения»).

Здесь же упомянем о графическом приеме «натянутой нити» (метод М. Варле, 1923 г.), дающем представление о возможном максимальном, предельном, использовании стока при наличии той или иной емкости водохранилища. При этом интегральная кривая стока смещается от исходного положения на величину емкости водохранилища, а касательные одновременно к двум полученным кривым дают представление о возможных величинах зарегулированных расходов.

В 1914 г. в США появилась статья А. Хазена [149]. В резуль-

тате статистической обработки ряда объемов водохранилищ, полученных на основе 300-летнего сборного ряда гидрометрических наблюдений на 14 реках, Хазен построил расчетный график для определения емкости водохранилища. При этом упомянутый ряд объемов принимался в качестве варьирующего при $C_s=0$. Учтенные емкости получались только как результат сработок и наполнений, т. е. емкости не ограничивались размерами. Это не соответствует действительной обеспеченности режима реального водохранилища, ограниченного размерами и потому в ряде случаев имеющего сбросы и перебои. Такая недопустимая условность, а также отсутствие обобщений возможных комбинаций варьирующего стока, т. е. застывший эмпиризм, и другие недостатки обесценили метод Хазена. Однако эта работа сыграла известную положительную роль. От нее вошло в теорию условное разделение емкости на две составляющие — многолетнюю и сезонную, а также идея об использовании в расчетах водохранилища функциональной связи между параметрами регулирования α, $\beta_м$, C_v и $P\%$.

В 1927 г. Садлер [154] сделал попытку устранить ошибки Хазена. Искусственный ряд был составлен Садлером путем деления теоретических кривых обеспеченности на 50 равновероятных ступеней. Величины стока, соответствующие этим ступеням, путем случайной выборки (без возврата шара, что неверно) были размещены в асимметричный, по кривой Пирсона типа III, 1000-летний ряд. Последний рассматривался не как варьирующий ряд, могущий давать различные комбинации стока, а как застывший в том его единственном виде, какой дала одна выборка. В СССР работа Садлера с ее эмпирическим смыслом также применения не нашла.

Советскими исследователями характеристики регулирования стока рассматриваются как результат взаимодействия фактически варьирующего стока с емкостью водохранилища при заданном водопотреблении.

В 1930 г. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [60] предложили метод вероятностного расчета многолетней, а также схему определения сезонной составляющих емкости водохранилища. Метод 1930 г. нашел широкое распространение. Этому способствовали работы П. А. Ефимовича, давшего зависимость для учета корреляционной связи объемов годового стока, и С. И. Рыбкина [105], который нашел аналитическое решение для $\beta_м$ и $n_{кр}$ и построил номограммы для их расчета. Метод 1930 г. был не вполне строгим, но его принципы и теперь еще нередко применяются при исследовании различных вопросов.

В 1935 г. Крицкий и Менкель [61] предложили второй метод, основанный на строгом статистическом расчете регулирования. В связи с громоздкостью расчетов метод нашел широкое применение лишь с 1939—1941 гг., когда появились расчетные графики Я. Ф. Плешкова (для $C_s=2C_v$) и его обоснование к применению их при расчете системы водохранилищ [77].

По мнению В. Г. Айвазьяна [4], эти графики можно перестроить применительно к различным соотношениям C_s и C_v, что и

выполнено Н. М. Милославским в 1950 г. Примерно к этому же времени Я. Д. Гильденблат и В. Р. Казак, использовав графики автора, построили региональные (для Донбасса) графики для определения всей полезной емкости водохранилища.

Однако метод 1935 г. дает строгое решение только для многолетней емкости при схематическом расчете сезонной составляющей и определении только обеспеченной отдачи.

В 1940 г. появились работы С. И. Рыбкина [103] и А. Д. Саваренского [106], в которых изложены способы нахождения обеспеченности отдачи, сбросов, наполнений и перебоев в режиме водохранилища. При этом в работе [103] все вероятностные обобщения относились только к $\beta_м$, а в работе [106] сезонная составляющая при обобщениях учитывалась промежуточным внутригодовым регулированием стока выбранных характерных лет.

Основная идея работы А. Д. Саваренского — установление связи начального наполнения водохранилища с конечным с помощью кривой обеспеченности стока — оказалась весьма плодотворной и широко использована в дальнейшем. В том же 1940 г. Крицкий и Менкель [61], используя идею Саваренского [106], распространили обобщенные расчеты на всю полезную емкость водохранилища с учетом связи смежных сезонных объемов стока, а в 1944 г. — на гидроэнергетические расчеты с построением региональных номограмм для рек Урала [62]. В 1959 г. эти же авторы аналитически решили задачу учета связи смежных годовых объемов стока при определении $\beta_м$ [57]. Это имеет важное значение при больших величинах отдачи, обеспеченности и коэффициентов изменчивости стока (т. е. для засушливых районов).

Соответствующие графики для $\beta_м$ были построены И. В. Гуглий при коэффициенте корреляции между смежными годовыми объемами стока $r=0{,}30$. При этом емкость $\beta_с$ учитывается, как и в методах 1930 и 1935 гг. Из элементов регулирования также находится только обеспеченная отдача.

Трудность построения обобщенных расчетных графиков для всей полезной емкости весьма препятствует широкому распространению универсальных методов 1940 г., освещающих все необходимые элементы регулирования стока.

В 1950 г. А. Д. Саваренский [107] для упрощения расчета вероятных сбросов, наполнений и перебоев предложил полуэмпирические графики предполоводных наполнений и дефицитов отдачи, построенные на основе регулирования по гидрометрическим рядам годовых объемов стока. Учитывая эту особенность графиков, они с успехом применяются для предварительного определения упомянутых элементов при значениях C_s, близких к $2C_v$.

К той же категории полуэмпирических относятся графики Г. П. Иванова [42] для определения $\beta_м$ и $n_{кр}$ при разных соотношениях C_s и C_v. В методическом смысле эти графики, обобщающие суммарный 1000-летний ряд, сходны с построениями Хазена, но не имеют ошибок последнего.

В 1963 г. И. П. Дружинин, Д. Маматканов [32] опубликовали графики той же категории, обобщающие ряды речного стока общей длительностью около 1800 лет. Такие графики используются в ряде случаев. Однако при этом имеются в виду общие недостатки, свойственные всем графикам этого вида (систематические ошибки в расчетах по ограниченным рядам стока [56], отсутствие учета возможных вариаций стока в каждом ряду и т. п.).

В 1964 г. Г. Г. Сванидзе [108] на основе расчетов по методу Монте-Карло предложил комплект номограмм (60 штук) для определения $\beta_м$ при разных значениях r и соотношениях $C_s : C_v$. Номограммы построены по 56 рядам по 1000 лет в каждом с тройным пересчетом на ЭВМ, причем общее число рядов — 168 с общей продолжительностью их 168 000 лет. При $C_s = 2C_v$ и $r = 0$ графики Сванидзе и Плешкова почти совпадают. Такая высокая производительность ЭВМ и ее удачные результаты позволяют надеяться на получение аналогичного комплекта графиков, освещающих все элементы регулирования (по методам 1940 г.) при разных гидрологических и водохозяйственных показателях половодья и межени: $\alpha_п$, $\alpha_м$, $C_{vп}$, $C_{vм}$, m, r, t и $P\%$ (например, при $C_s = 2C_v$).

К 1967 г. в работе [45] Н. А. Картвелишвили математически описал процессы стока и его регулирования; составил системы уравнений, определяющих координаты кривой обеспеченности наполнений с учетом стохастической связи между объемами стока смежных лет. Уравнения решаются при помощи ЭВМ. В книге [46] содержатся предложения по математизации регулирования стока и по оптимизации (с применением ЭВМ) работы ГЭС и энергосистем. Первое из этих направлений в течение ряда лет разрабатывают также С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [57], В. П. Захаров и В. Я. Ким [39], В. А. Киктенко [49], Э. Н. Оширов и др.; второе направление освещается в работах [46, 96, 129] и др.

Оптимизация дает недоступное для ручного счета (по трудоемкости) наиболее выгодное решение из множества возможных вариантов при заданных условиях. Так, искомый вариант схемы использования реки (или параметров отдельного гидроузла) выявляется наряду с определением степени удовлетворения водой участников водохозяйственного комплекса (ВХК) при наибольшем общем экономическом эффекте.

При выборе режима работы заданного каскада или отдельной ГЭС в зависимости от вида участников ВХК или решающего экономического фактора за критерий оптимальности принимают один из минимумов: а) ущерба для народного хозяйства [137]; б) суммарных затрат энергосистемы; в) расхода условного топлива на ГРЭС или максимум выработки ГЭС.

Более узкой задачей оптимизации может быть выбор: 1) структуры и параметров станций энергосистемы; 2) варианта развития системы (времени и места установки новых агрегатов); 3) режима ограничения водопользования для участников ВХК при появлении ограничения водных ресурсов или наступлении перебоев и др.

К частным задачам в условиях эксплуатации относится: 1) суточное распределение активных нагрузок между ГРЭС и ГЭС системы; 2) выбор суточной величины резерва мощности и его разверстка по станциям; 3) годовое распределение выработки энергии между ГРЭС и ГЭС и др.

Сущность расчетов рассмотрим на примере распределения известного количества воды (при ее дефиците) между участниками конкретного ВХК, включающего заданные компоненты энергопроизводственной системы (ЭПС) — ГЭС, ТЭС,

энергопотребители — и компоненты неэнергетического водопотребления (НЭВ) — орошение, водный транспорт и др. [137].

В связи с трудностью создания общего алгоритма для этой задачи ее решают поэтапным методом динамического программирования. Сперва оптимизируется режим работы водопотребителей ЭПС при нескольких вариантах дефицита воды, т. е. и энергии ГЭС ($Э_д$). Затем оптимизируем распределение остатка воды (после ЭПС) между компонентами НЭВ для того же ряда $Э_д$. Далее устанавливаем минимум-миниморум дополнительных расчетных затрат по всему ВХК.

Начиная с оптимизации режимов отдельных элементов — агрегатов электростанции, постепенно увеличивая на единицу их число, находим оптимальную расходную характеристику ГЭС и аналогично функцию от $Э_д$ минимумов топлива эквивалентной ТЭС, вводимой для учета потерь на топливе.

Потом производим оптимальное распределение нагрузки между ГЭС и эквивалентной ТЭС (при тех же $Э_д$) и по заданной связи между величинами $Э_д$ и ущербов строим суммарную характеристику минимальных ущербов для ЭПС в зависимости от $Э_д$.

Аналогично изложенному выполняются расчеты для участников НЭВ. При этом должна быть известна суммарная потребность воды для них и зависимость ущербов от недодачи воды по каждому из них.

Суммарный дефицит воды для НЭВ (по всем его вариантам, соответственно величинам $Э_д$) распределяется между компонентами НЭВ так, чтобы общие ущербы по НЭВ в целом были минимальны при каждом $Э_д$. Это выполняется подобно описанной выше оптимизации режима агрегатов ТЭС. Затем находим суммарную характеристику минимальных ущербов для всех компонентов НЭВ соответственно дефицитам $Э_д$. Наконец, сложением суммарных характеристик для ПЭС и НЭВ получаем величины всех народнохозяйственных затрат как функцию от $Э_д$. Их минимум дает искомое распределение воды между всеми компонентами ПЭС и НЭВ.

Изложенные расчеты выполняются по ряду вариантов располагаемого количества воды для освещения режима ВХК, например при различных перебоях отдачи водохранилища с глубоким многолетним регулированием стока.

В связи с развитием участников ВХК или изменением условий их работы оптимальный режим комплекса периодически пересматривается и корректируется.

Задачам оптимизации сопутствуют этапы подготовки расчетов на ЭВМ: 1) выбор численного метода решения; 2) разработка алгоритма (описание последовательности действий); 3) составление программы; 4) отладка хода решений (с контролем последних). При этом нередко возникают затруднения в связи со сложностью определения ущербов из-за недодачи воды, с отсутствием безупречной методики технико-экономических расчетов, с неизученностью многих технологических вопросов (допускаемое качество воды, ее самоочищение, условия рыбоводства, прогнозы стока и др.). Кроме того, методы механизации решения по ряду сложных задач водного хозяйства пока только разрабатываются.

Оптимизация водохозяйственных решений, все более развиваясь, формируется в особый комплекс вопросов математизации, моделирования и программирования, выходящих за пределы данной работы.

Таким образом, начиная в основном с 1930 г., теория регулирования стока, методы и приемы водохозяйственных расчетов непрерывно развиваются и обогащаются. Первым учебником в этой отрасли знаний была книга М. В. Потапова «Регулирование стока» (1933 г.), переизданная в 1940 г. и затем включенная в собрание его сочинений (1951 г.). Там же изложены суждения М. В. Потапова о расчетах регулирования стока на переменные оросительные нормы, регулирования паводочного стока, продвижения волны и др. [91].

Важное место в развитии методов и приемов регулирования стока занимают также работы В. Г. Андреянова [7], С. Н. Ники-

тина [73], П. А. Ляпичева [70], В. А. Бахтиарова [12], Д. В. Кореновстова [52] и др.

Из иностранных авторов, кроме Хазена и Садлера, можно отметить следующих. Г. Е. Херст [150] в результате статистической обработки наблюденных данных вывел формулы для расчета объема водохранилища при многолетнем регулировании стока при $C_s=0$. На основании случайной выборки (розыгрыша) установлена общая зависимость между объемом водохранилища, стандартным отклонением стока от нормы и продолжительностью периода наблюдений. Недостатки метода обусловлены эмпирическим подходом к расчетам регулирования и пренебрежением понятия обеспеченности.

А. Фати и С. Шукри [147], критикуя этот метод, предложили свою более удачную расчетную формулу, но с тем же эмпирическим смыслом. Попытки охватить одной формулой многообразные условия расчета успеха не имеют.

Р. Д. Дхир и др. [146], используя наблюденную последовательность годовых объемов стока и развивая предложения Лэнга [152], строят (при разных обеспеченностях отдачи) графики связи зарегулированного стока в перебойные годы с его обеспеченностью и емкостью водохранилища. Работе свойственны все условности расчетов, выполняемых по рядам стока.

Дик и Глос [155], Морль (по сезонному регулированию в гидроэнергетике) и другие в своих статьях пытаются использовать теорию вероятностей.

Р. А. Моран [153] первый установил основные элементы режима водохранилищ путем решения системы функциональных уравнений. Это новое направление в теории регулирования стока. Приток представляется как случайный процесс, но связь между годовыми объемами притока не учитывается. Этот же вопрос рассматривался в работе Хамерслея.

Лэнгбейн [151] пытается определить по одной формуле с постоянными эмпирическими коэффициентами емкость водохранилища, даже с учетом корреляции стока смежных лет. Критика этого метода дается в статье М. Б. Файеринга [148], посвященной моделированию гидрологического ряда методом Монте-Карло (см. § 11) и расчетам на ЭВМ.

В СССР препятствие, возникшее в связи с необходимостью учета связи стока смежных лет, преодолено после выхода работ [57, 45, 129], в которых освещены основные элементы регулирования при помощи системы уравнений. Приемы этого направления приходят на смену сложным графоаналитическим расчетам и являются наиболее эффективным средством определения элементов регулирования стока. Использование достижений науки в этой области с применением ЭВМ снизит трудоемкость расчетов, повысит точность и обоснованность решений по большему числу их вариантов, позволит применять более совершенную методику к сложным схемам работы установок.

Ниже приводятся основные из перечисленных методов.

§ 10. РАСЧЕТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ХРОНОЛОГИЧЕСКОМУ РЯДУ ВЕЛИЧИН СТОКА

Этот прием расчетов регулирования стока выполняется в графической или табличной форме.

Изменение притока и потребления во времени можно представить в виде гидрографов и суммарных (интегральных) кривых. Интегральные кривые — это графическое изображение хронологической последовательности стока или потребления в нарастающем виде.

Интегральные кривые используются как один из приемов расчета регулирования стока. Этот прием, хотя и страдает отмеченными ранее существенными недостатками, но выгодно отличается иллюстративными преимуществами. Такая особенность приема имеет важное значение для ознакомления с сущностью сезонного и многолетнего регулирования и для прослеживания процесса регулирования стока. В особо сложных случаях водохозяйственных условий расчет по фактическому ряду величин стока является нередко единственно приемлемым.

Интегральные кривые в прямоугольных координатах

Площадь элементарной полоски с основанием dt и высотой Q на гидрографе стока (рис. 27 *а*) дает элементарный объем

$$dW = Q\,dt. \tag{26}$$

Объем стока за время t_1 равен

$$W = \int_0^{t_1} Q\,dt. \tag{26'}$$

Если последовательно вычислять объемы стока W_1, W_2, ... соответственно за отрезки времени 0—t_1, 0—t_2, ... и откладывать их в прямоугольной системе координат (в масштабе объемов — по оси ординат и в масштабе времени — по оси абсцисс), то найдем ряд точек. Соединяя их, получим кривую (рис. 27 *б*), которая называется интегральной, или суммарной, кривой стока.

Построение интегральной кривой ведется по точкам через конечные интервалы времени Δt, причем $\Delta W = Q\,\Delta t$, $W = \sum_0^t Q\,\Delta t$, а при $\Delta t = \text{const}$ $W = \Delta t \sum_0^t Q$, где Q — средние расходы за интервалы Δt.

Интегральная кривая имеет следующие свойства:

1) каждая ордината кривой дает суммарный сток за время от начала учета стока до момента, которому соответствует данная ордината;

2) разность ординат двух точек кривой равна объему стока за интервал времени между ними;

3) при $Q=\text{const}$ в некотором интервале времени объем стока в пределах этого интервала изображается уравнением прямой $W=Qt$, а интегральная кривая ступенчатого гидрографа стока будет иметь вид ломаной линии;

4) тангенс угла наклона α к оси абсцисс линии, секущей интегральную кривую в точках A и B, равен величине среднего расхода $Q_{ср}$ в интервале времени между этими точками (рис. 28)

$$\operatorname{tg}\alpha = BC : AC = \Delta W : \Delta t = Q_{ср};$$

5) с приближением точки B к точке A и в пределе при совмещении с ней секущая обращается в касательную. Тангенс угла наклона ее к оси абсцисс равен расходу в точке касания: $\operatorname{tg}\alpha = \frac{dW}{dt} = Q$, если 1 м³ и 1 с имеют одинаковый масштаб, например 1 мм. Если же масштабы m_W и m_t для объема и времени разные, то $BC = \Delta W : m_W$, а $AC = \Delta t : m_t$, причем $\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta W}{m_W} : \frac{\Delta t}{m_t} = Q\frac{m_t}{m_W}$ или $Q = \operatorname{tg}\alpha \frac{m_W}{m_t}$.

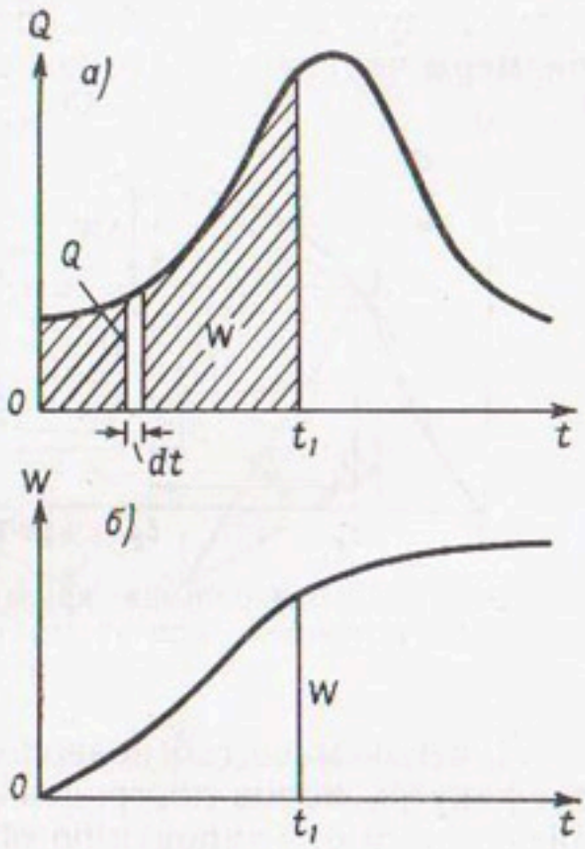


Рис. 27. Гидрограф (*а*) и интегральная кривая (*б*).

Лучевой масштаб. Практически расходы на интегральной кривой определяются не по $\operatorname{tg}\alpha$, а по лучевому масштабу, на котором наклон любой линии соответствует определенному $\operatorname{tg}\alpha$, т. е. и расходу Q. Это позволяет по наклону секущей или касательной при помощи треугольника и линейки непосредственно определять расходы на любом участке интегральной кривой. Объясним суть лучевого масштаба.

В пределах чертежа с интегральной кривой проведем горизонтальный отрезок $OM=p$, через точку M — вертикальную линию (рис. 28 *б*), а через точку O — линию ON, параллельную AB. Из подобия треугольников ONM и ABC следует, что

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

откуда $NM=pQ$.

Таким образом, прямые, проведенные из точки O параллельно секущим или касательным суммарной кривой, отсекают на оси NM отрезки, пропорциональные соответствующим расходам. Значит, ось NM есть шкала расходов, а рис. 28 *б* в целом — лучевой масштаб. Точка O называется полюсом лучевого масштаба, а отрезок p — полюсным расстоянием.

Отрезок NM в масштабе расходов m_Q равен $Q : m_Q$, с другой стороны $NM = p \operatorname{tg} \alpha$ или $\frac{Q}{m_Q} = pQ \frac{m_t}{m_W}$, откуда

$$p = \frac{m_W}{m_Q m_t}, \tag{27}$$

где m_W, m_Q, m_t — числа в м³, м³/с и с в одной и той же линейной единице (в 1 см или в 1 мм). Та же линейная размерность относится и к p.

Чтобы интегральная кривая и лучевой масштаб имели приемлемые размеры и были удобными для пользования, масштабы m_W и m_t следует между собой согласовать. При этом надо иметь в виду размеры чертежа по абсциссе и ординате, т. е. крутизну лучей.

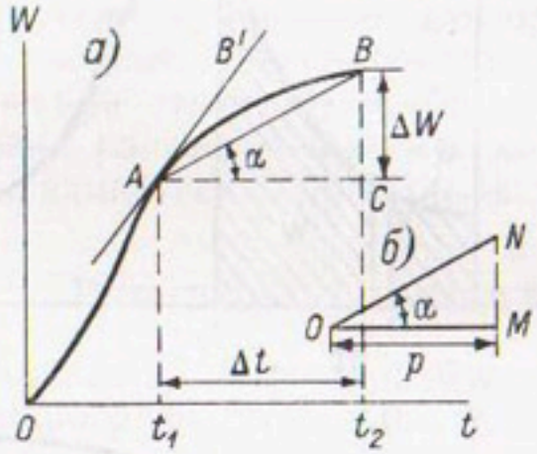


Рис. 28. Интегральная кривая (*а*) и лучевой масштаб (*б*).

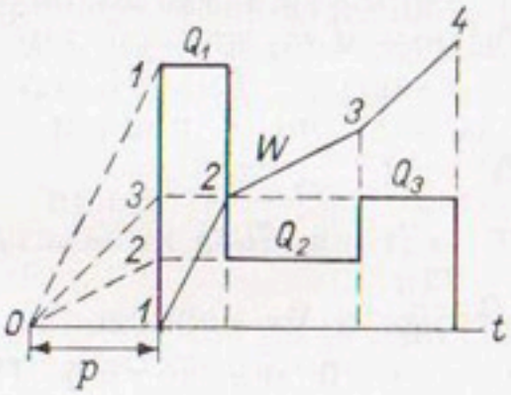


Рис. 29. Гидрограф, лучевой масштаб и интегральная кривая стока.

Лучевой масштаб позволяет по ступенчатому хронологическому графику расходов построить суммарную кривую, не прибегая к вычислению и суммированию объемов. На рис. 29 имеем график расходов Q_1, Q_2, Q_3, ... в масштабе m_Q и m_t. Приняв для кривой W масштаб m_W, находим полюсное расстояние p и сносим на шкалу Q все расходы графика, а из полюса ко всем этим делениям проводим лучи. Затем в пределах каждого расхода на графике, начиная от первого, последовательно, от одного к другому, проводим отрезки *1—2*, *2—3*, *3—4*, ..., параллельные соответствующим лучам. Полученная ломаная линия и будет суммарной линией стока.

Точность нанесения участков кривой проверяется непосредственным подсчетом (для любого интервала Δt) приращения объема ΔW при известном Q или расхода Q при известном ΔW, определяемом по суммарной кривой или по таблице к ней (по разности суммарного стока в конце и в начале Δt).

Разностные интегральные кривые

Построение полной интегральной кривой в прямоугольных координатах за длительный период времени требует больших размеров чертежа по вертикали или очень мелкого масштаба объемов. Тогда

кривая теряет наглядность и пригодность для расчетов регулирования. Поэтому в проектной практике обычно используется разностная (сокращенная) интегральная кривая, которая может быть представлена и как полная интегральная кривая в косоугольных координатах. Для такой кривой при нормальных размерах чертежа масштаб объемов не уменьшается. Сохраняя наглядность и пригодность для расчетов регулирования, кривая отчетливо изображает характерные фазы стока — половодье и межень, многоводные и маловодные годы и периоды.

Для построения разностной кривой нанесем на гидрограф стока (рис. 30 *а*) некоторый постоянный расход Q_0, вычтем его из всех расходов Q и, суммируя разности $Q - Q_0$, получим

$$W' = \int_0^t (Q - Q_0)\, dt = \sum_0^t (Q - Q_0)\, \Delta t, \qquad (28)$$

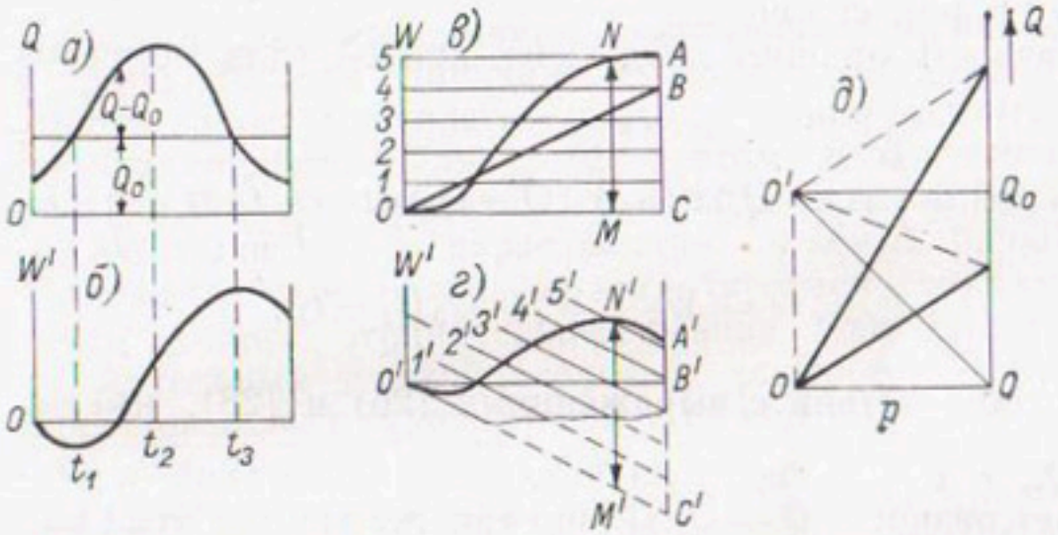


Рис. 30. Гидрограф (*а*), интегральные кривые в прямоугольных (*б* — разностная, *в* — полная) и косоугольных (*г*) координатах и лучевой масштаб (*д*).

или

$$W' = \int_0^t Q\, dt - \int_0^t Q_0\, dt = \sum_0^t Q\, \Delta t - \sum_0^t Q_0\, \Delta t = W - W_0, \qquad (28')$$

где W — ордината обычной интегральной кривой в прямоугольных координатах; W_0 — ордината аналогичной кривой для постоянного расхода Q_0, т. е. для условного равномерного стока. Откладывая величины W' на рис. 30 *б*, получаем разностную интегральную кривую.

На рис. 30 *в* показаны интегральные кривые в прямоугольных координатах, построенные для фактического стока (OA) и для постоянного расхода Q_0 (OB). По формуле (28′), ординаты разностной кривой равны вертикальным отрезкам между линиями OA и OB. Значит, кривая $O'A'$ (рис. 30 *г*) — та же кривая OA, но построенная так, что прямая OB заняла горизонтальное положение, а прежняя ось абсцисс — наклонное $O'C'$. Любой вертикальный

отрезок $M'N'$ между $O'A'$ и $O'C'$ равен отрезку MN между OA и OC. Поэтому кривую $O'A'$, т. е. разностную кривую в осях $O'B'$ и $O'W'$, можно рассматривать как полную интегральную кривую в косоугольных координатах $O'C'$ и $O'W'$.

Для контроля построений и для отсчета полных ординат проводим ряд прямых, параллельных $O'C'$, соответственно круглым значениям объемов стока на оси $O'W'$. Эти прямые служат косоугольной координатной сеткой шкалы объемов. При наличии такой сетки в принципе разности можно не подсчитывать, а непосредственно откладывать парастающие объемы стока от ближайших линий сетки. Однако практически более удобно кривую строить по парастающим разностям, откладываемым от оси абсцисс, причем косоугольная сетка обычно не наносится.

Из построения сокращенной интегральной кривой вытекают следующие ее свойства:

1) поскольку в отдельные периоды $Q<Q_0$, то кривая в эти интервалы направлена вниз;

2) разность ординат двух точек кривой (для моментов t_1 и t_2) равна

$$W_2'-W_1'=\int_0^{t_2}(Q-Q_0)\,dt-\int_0^{t_1}(Q-Q_0)\,dt=\int_{t_1}^{t_2}Q\,dt-\int_{t_1}^{t_2}Q_0\,dt=$$

$$=W_2-W_1-Q_0(t_2-t_1); \qquad (29)$$

3) в соответствии с выражениями (26) и (28), имеем $\frac{dW'}{dt}=Q-Q_0$, т. е. тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс выражает разность $Q-Q_0$. Точно так же тангенс угла наклона секущей дает среднее значение разности $Q-Q_0$ или разность $Q_{ср}-Q_0$. При $Q=Q_0$ $\frac{dW'}{dt}=0$, т. е. в таких точках сокращенная кривая имеет максимум или минимум (точки перелома);

4) если Q_0 равен среднему расходу за весь ряд, т. е. $Q_0=Q_{ср}$, конечная точка кривой W' ляжет на ось абсцисс;

5) лучевой масштаб строится, как и для кривой, в прямоугольных координатах. Но так как здесь суммируются разности $Q-Q_0$, то, чтобы отнять от каждого расхода величину Q_0, надо полюс O переместить вверх на эту величину (по шкале расходов лучевого масштаба, рис. 30 *д*).

Практическое построение интегральных кривых

В практике водохозяйственных расчетов применяются оба вида интегральных кривых. Для построения кривой в прямоугольной системе координат составляется таблица объемов притока в водохранилище за конкретные одинаковые интервалы времени, например по месяцам или по годам в целом. В последнем случае внутригодовая неравномерность притока исключается. Затем эти объемы по-

следовательно суммируются и нарастающие суммы откладываются в системе координат. Соединяя точки прямыми, получаем восходящую ломаную линию, дающую в каждой точке суммарный приток от начала исчисления. Расход воды за какой-нибудь отрезок времени, как известно, равен тангенсу угла наклона прямой, соединяющей соответствующие точки на интегральной линии, к оси абсцисс (с учетом масштабов m_W и m_t). Для удобства определения расходов по кривой наносят на поле графика лучевой масштаб, причем горизонтальный луч дает $Q=0$. Эта система построений применяется обычно при непродолжительном периоде исчисления суммируемых величин (стока или водо- и энергопотребления). Она используется при расчете суточного регулирования мощности, покрытии графиков нагрузок, регулировании стока за отдельный интервал продолжительностью 1—3 года.

Для построения интегральных кривых стока и водопотребления за длительный ряд лет применяется сокращенная, или разностная, интегральная кривая. При этом в дополнение к подсчетам нарастающих объемов стока выполняются следующие операции. Определяется объем стока за единичный интервал, например месяц, по равномерному за все многолетие расходу, принимаемому равным или близким к среднему. Для удобства этому объему можно придать округленное значение. Затем из нарастающих объемов фактического стока вычитаются нарастающие объемы равномерного стока. Положительные разности этих объемов откладываются вверх от оси абсцисс, отрицательные — вниз. Наибольшая амплитуда положительных и отрицательных разностей, отложенных в масштабе, определяет размер графика по вертикали.

Если объемы равномерного стока были подсчитаны точно по среднему за многолетие расходу, то конечная точка кривой расположится на оси абсцисс, причем луч среднего расхода будет горизонтальным. При округлении средних расходов последняя точка кривой не совпадает с осью абсцисс и луч среднего за многолетие расхода, соответствующий направлению прямой, соединяющей начало и конец интегрального графика, отклонится от горизонтального положения.

Масштабы объемов и времени следует выбрать такими, чтобы участки интегральной кривой с расходами межени не были очень крутыми. Ради наглядности на графике могут быть нанесены наклонные линии равных объемов ($Q=0$). Для этого на начальном участке кривой выбирается какая-нибудь точка с известным суммарным объемом стока, которая соединяется с точкой для того же объема на оси ординат. Параллельно этой прямой проводятся затем линии нулевых расходов через одинаковые интервалы округленных объемов (например, 0,0; 200; 400 млн. м^3 и т. д.).

Пусть, например, суммарный объем фактического стока за все многолетие (20 лет) равен 155 млн. м^3. Линии равных объемов проводятся через 15 млн. м^3. При этом на оси абсцисс должно быть отложено $155:15=10{,}33$ интервала. Если время откладывается в масштабе: 2 мм — один месяц, то общая длина шкалы времени

будет $2 \cdot 12 \cdot 20 = 480$ мм, а длина интервала между линиями равных объемов равна $480 : 10{,}33 = 46{,}4$ мм, причем от начала координат до конца, например, пятого интервала должно быть отложено $46{,}4 \cdot 5 = 232$ мм, до конца шестого — $46{,}4 \cdot 6 = 278$ мм и т. д. Последняя точка интегральной кривой по суммарному объему фактического стока должна точно соответствовать объему по нанесенной косоугольной системе координат или конечной разности в прямоугольной системе.

Лучевой масштаб расходов также строится довольно просто. На поле графика наносится вертикальная шкала расходов от нуля до величины, несколько большей среднего расхода за многолетие.

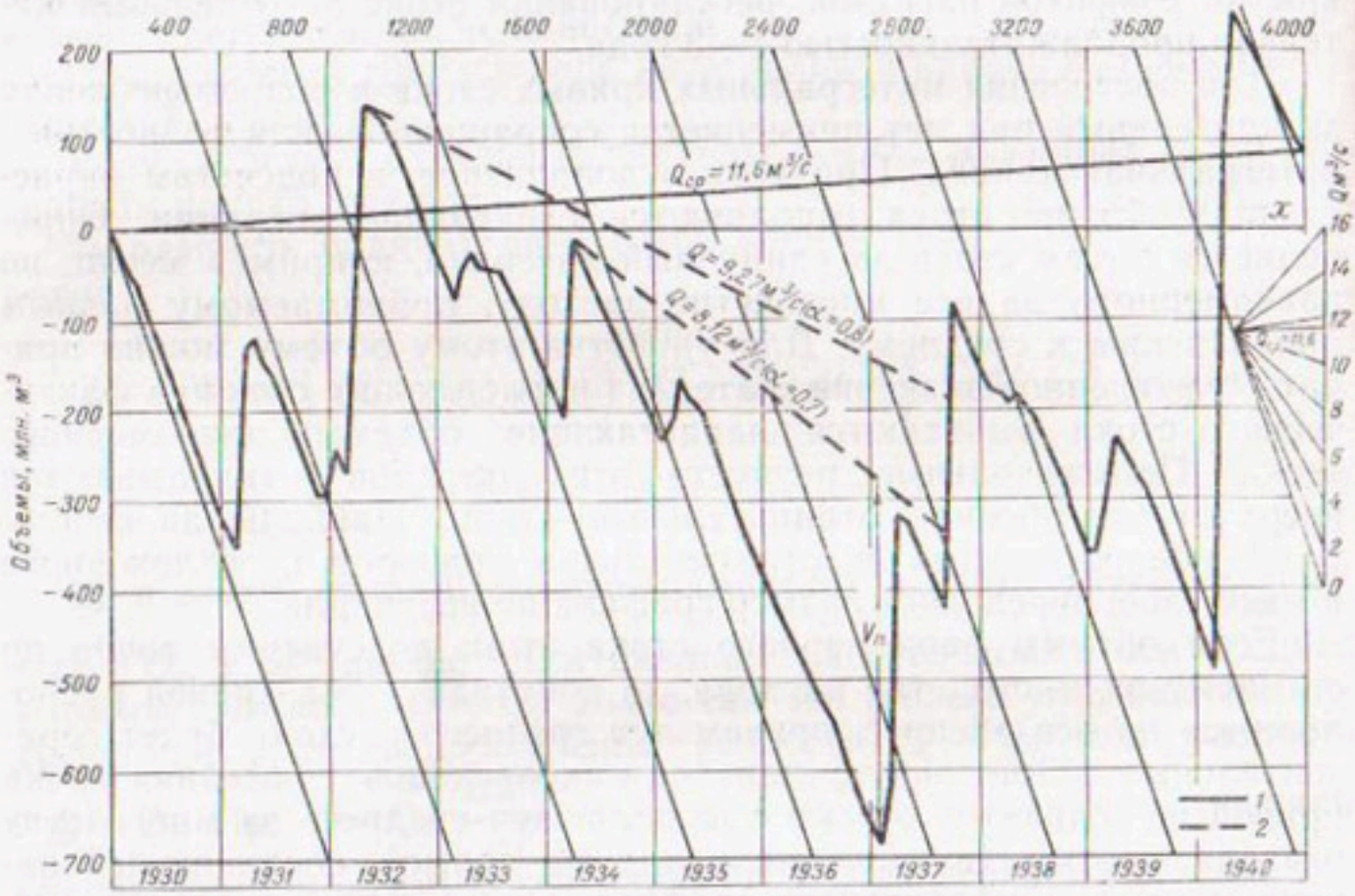


Рис. 31. Интегральные графики стока (*1*) и водопотребления (*2*) в косоугольной системе координат.

От точки на этой шкале с расходом $Q = 0$ проводится луч нулевых расходов, параллельный или совпадающий с линией постоянных объемов. От точки с расходом $Q = Q_{ср}$ на той же шкале проводится линия, параллельная прямой, соединяющей начало и конец интегрального графика. Пересечение этих двух прямых для $Q = 0$ и для $Q = Q_{ср}$ образует полюс, от которого проводятся лучи через соответствующие деления расходов на шкале (5, 10, 15 м³/с и т. д.). У каждого луча надписывается расход воды. Полюсное расстояние можно определить также по зависимости (27).

Если, например, для построения интегральной кривой приняты масштабы: объемов 1 см — 20 млн. м³ и времени 1 см — 10 месяцев, линейный масштаб шкалы расходов 1 см — 0,2 м³/с, то полюсное

расстояние будет равно

$$p = \frac{m_W}{m_Q m_t} = \frac{20 \cdot 10^6}{0{,}2 \cdot 10 \cdot 2{,}63 \cdot 10^6} = 3{,}8 \text{ см}.$$

Перенося при помощи треугольника и линейки направление какого-нибудь участка интегральной кривой на лучевой масштаб, можно узнать величину расхода в интервале, соответствующем упомянутому участку.

Ход расходов водопотребления можно нанести в виде линии на поле интегральной кривой, пользуясь лучевым масштабом. Такая линия откладывается от расположенной на кривой стока точки, ближайшей к началу отсчета, за которой расходы воды в реке становятся меньше требуемого расхода в это время года. Наносимая линия в некоторый момент сливается с интегральной кривой стока на участке ее повышенных расходов и затем продолжается со следующей ближайшей точки этой кривой на участке низких расходов стока и т. д.

Так образуется интегральная кривая водопотребления. Вертикальные отрезки между указанными кривыми показывают ход во времени дефицитов воды (в масштабе объемов), наибольший из которых определяет необходимую полезную емкость водохранилища для покрытия заданного водопотребления в пределах рассматриваемого периода времени.

Расчет разностной кривой показан в табл. 20.

В табл. 20, кроме нарастающих объемов фактического стока (графа 5), даны объемы равномерного стока (графа 6) по округленной величине объема за месяц (30 млн. м³), близкого к среднему (30,6 млн. м³). Начало расчетного периода 1/I 1930 г. принимается за нуль. Разности (графа 7) со своим знаком (±) откладываются от оси абсцисс $0 - x$ (рис. 31). Для построения кривой приняты следующие масштабы: объемов 1 см — 100 млн. м³, времени 1 см — 10 месяцев, шкалы расходов 1 см — 4 м³/с, причем полюсное расстояние лучевого масштаба

$$p = \frac{100 \cdot 10^6}{4 \cdot 10 \cdot 2{,}63 \cdot 10^6} = 0{,}95 \text{ см}.$$

Кривая показывает, что весной 1932, 1937 и 1940 гг. на реке были обильные половодья, в 1933, 1935 и 1938 гг. — незначительные, а в 1930 и 1936 гг. они вовсе отсутствовали.

Для некоторого луча (например, при зарегулированном расходе $Q = 8{,}12$ м³/с) наибольший полезный объем водохранилища в пределах всего периода приходится к концу зимы 1936-37 г. С увеличением α период от начала сработки до нового заполнения водохранилища возрастает. При α, равных 0,7; 0,8 и 0,9, он соответственно равен 4, 6 и 8 годам.

Таблица 20

Расчет к построению интегральной кривой стока

Год	Месяц	Среднемесячный расход воды, $м^3/с$	Месячный объем стока, 10^6 $м^3$	Нарастающий объем, 10^6 $м^3$	Нарастающий объем равномерного стока, 10^6 $м^3$	Разность граф 5 и 6 к концу месяца, 10^6 $м^3$
1	2	3	4	5	6	7
1930	I	1,65	4,34	4,34	30	—25,7
	II	3,04	8,00	12,3	60	—47,7
	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
	XI	1,15	3,02	44,4	330	—285,6
	XII	1,82	4,79	49,2	360	—310,8
1931	I	3,59	9,45	58,6	390	—331,4
	II	2,57	6,77	65,4	420	—354,6
	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
	XI	1,49	3,92	393,3	690	—296,7
	XII	12,8	33,6	426,9	720	—293,1
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
1940	I	1,47	3,86	3164,9	3630	—465,1
	II	3,09	8,13	3173,0	3660	—487,0
	III	240	632	3805,0	3690	115,0
	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
	XI	3,18	8,36	4028,4	3930	98,4
	XII	5,35	14,05	4042,4	3960	82,4
Среднее		11,6	30,6			

Основные случаи и техника расчетов регулирования стока по интегральным кривым

Жесткий график водопотребления представляет собой потребные расходы воды на определенные календарные даты. Этот график обычно имеет ступенчатый вид и рассматривается как неизменный по годам гидрометрического ряда при заданном уровне развития водного хозяйства.

График потребления постоянного расхода в течение всего года показывает наиболее простую форму использования стока, регулирование которого в таких случаях представляется как элементарная задача.

При регулировании на постоянный расход избытки стока над потреблением, появляющиеся обычно весной, идут на заполнение водохранилища, а при изобилии воды даже сбрасываются вхолостую.

Водный баланс водохранилища за период его работы между моментами t_1 и t_2 определяется объемами поступающей и расходуемой воды за этот период.

Запас воды в конце периода будет равен

$$V_2 = V_1 + \int_{t_1}^{t_2} (Q_{\text{пр}} - Q)\,dt = V_1 + \int_{t_1}^{t_2} Q_{\text{пр}}\,dt - \int_{t_1}^{t_2} Q\,dt. \qquad (30)$$

Здесь V_1 — запас воды в момент t_1; $Q_{\text{пр}}$ — приток в водохранилище; Q — расход воды из него.

Понятно, что первый интеграл выражает приращение объема притока за период, а второй — приращение объема расходуемой воды. Это значит, что разности ординат интегральных кривых притока и потребления дают величину наполнения или сработки водохранилища в любой момент.

Если за некоторый период объемы поступающей и расходуемой воды одинаковы, т. е. первый интеграл равен второму, то наполнение водохранилища за период остается без изменения.

Следовательно, параллельная интегральной кривой линия, отстоящая вверх от нее на некотором расстоянии, будет характеризовать неизменное наполнение. Если это расстояние в масштабе шкалы объемов принять равным полезной емкости, то верхняя линия будет линией пустого водохранилища, а нижняя — полного. Любая другая проведенная между ними параллельная линия будет соответствовать промежуточному, но также неизменному наполнению. Оно равно объему в пределах ординаты между линией пустого водохранилища (верхней) и данной линией.

При неравенстве потребления и притока наполнение водоема будет изменяться в зависимости от того, какая из этих статей баланса преобладает. Поэтому интегральная кривая зарегулированного стока, т. е. полной величины отводимого из водохранилища расхода брутто (включая полезное потребление, холостые сбросы и потери), изобразится линией регулирования, которая, располагаясь между верхней и нижней кривыми, направляется то к первой, если приток меньше потребления, то ко второй, при обратных соотношениях поступления и расхода воды. На некоторых участках линия регулирования остается параллельной крайним линиям или совпадает с одной из них.

Это происходит в отрезке времени, когда зарегулированный расход равен естественному притоку. Совпадение линий при пустом водохранилище обычно означает перебой в отдаче, при полном — избыток притока, сбрасываемого вхолостую.

Нередко изображается только одна интегральная кривая притока, которая принимается за линию полного водохранилища. Верхняя же граница лишь отмечается отдельными точками на тех участках, где к ней приближается линия регулирования.

Отметим одно важное практическое следствие, вытекающее из построения интегральных кривых и используемое при регулировании стока в различных створах, в которых соответственные среднемесячные расходы находятся в одинаковых соотношениях (например, когда сток из одного створа переносится в другой путем умножения на постоянный коэффициент). В таких условиях для всех створов можно воспользоваться одной интегральной кривой стока, относящейся к любому из створов. Для этого необходимо изменить масштаб объемов

интегральной кривой в число раз, равное соотношению расходов в новом створе и в исходном (или же на это соотношение умножить объемы водохранилища, получаемые в новом створе по кривой для исходного створа).

Действительно, если в исходном створе объем стока V_1 за какой-нибудь период времени T при расходе Q_1 равен

$$V_1 = \int_0^T Q_1\,dt. \tag{31}$$

то во втором створе соответственно

$$V_2 = \int_0^T Q_2\,dt = \int_0^T \frac{Q_2}{Q_1} Q_1\,dt = \frac{Q_2}{Q_1}\int_0^T Q_1\,dt = V_1\frac{Q_2}{Q_1}. \tag{31'}$$

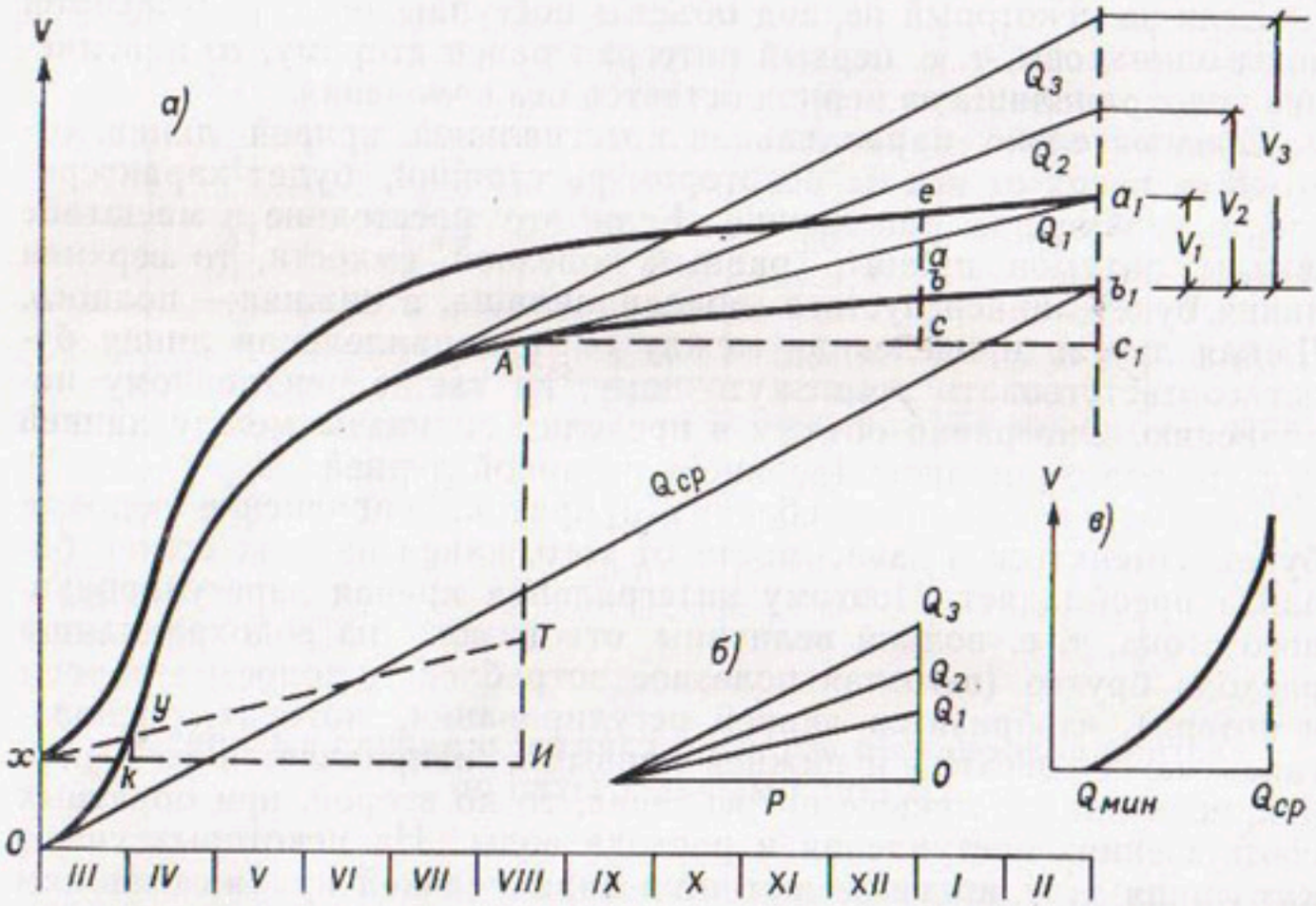


Рис. 32. Определение емкости водохранилища при сезонном регулировании стока.

Интегральная кривая стока используется для решения ряда вопросов регулирования стока при различных вариантах водопотребления.

Рассмотрим часто встречаемые случаи расчетов по основным видам регулирования стока.

Сезонное регулирование. Прямая задача (см. § 9). На интегральной кривой в прямоугольных координатах за расчетный маловодный год (начало половодья — конец межени) (рис. 32 *а*) проводим вправо касательную Aaa_1 с наклоном заданного расхода Q_1 по лучевому масштабу (рис. 32 *б*). Это — интегральная кривая зарегулированного расхода в течение межени, когда приток меньше потребления. В момент времени *c* дефицит воды в масштабе шкалы объемов составляет *ab*, а в конце межени

он достигает максимального значения a_1b_1. За весь период межени Ac_1 приток равен b_1c_1, а отдача a_1c_1, причем дефицит $a_1b_1 = a_1c_1 - b_1c_1$ должен быть равен емкости водохранилища V_1, которая к началу межени (в точке A) заполнена, а в конце ее — опорожнена.

Наполнение начинается с наступлением половодья: из точки x на линии пустого водохранилища (выделив $ox = a_1b_1$, линию можно не показывать) проводится луч заданного расхода до пересечения с нижней кривой в точке y. Водохранилище наполняется за время xk и остается полным до начала сработки (в точке A).

Поскольку при этом потребление меньше притока, то на отрезке времени $kИ$ интегральные кривые естественного и зарегулированного стока совпадают, а избытки воды сбрасываются. Объем сбросов равен AT. Остальной сток с начала года до момента $И$ пошел на потребление ($TИ$) и заполнение водохранилища (ox).

Обратная задача (см. § 9) и решается в обратном порядке. От конца интегральной кривой притока вверх откладывается в масштабе заданная емкость $V_1 = a_1b_1$ (рис. 32 *а*). Проводя через точку a_1 касательную к кривой, находим по лучевому масштабу зарегулированный расход. Остальной участок линии регулирования строится так же, как и в первой задаче.

Определив для *3—4*-го вариантов объема V величины зарегулированных расходов Q, можно построить зависимость $Q = f(V)$, служащую водохозяйственной основой для выбора регулирующей емкости. Крайними точками этой зависимости (рис. 32 *в*) являются: точка для $V = 0$, которой соответствует минимальный естественный расход $Q_{мин}$, и точка для $Q = Q_{ср}$ при емкости, обеспечивающей полное годовое регулирование.

Точно так же рассмотренные задачи решаются и по интегральным кривым в косоугольных координатах.

Первую из рассмотренных задач можно решить и следующим способом. По всем годам имеющегося (или расчетного) гидрометрического ряда проводится регулирование стока для заданного постоянного расхода межени. Отбираются наибольшие емкости (по одной из каждого года) и располагаются в убывающем порядке для построения кривой обеспеченности объемов по формуле (9). Необходимая емкость снимается с этой кривой по абсциссе $100 - P$ (P — обеспеченность заданного расхода).

Аналогично этому можно найти обеспеченный расход при заданной емкости. Последняя откладывается в каждом году в конце периода низкого стока, а зарегулированные расходы, определяемые по лучевому масштабу, представля-

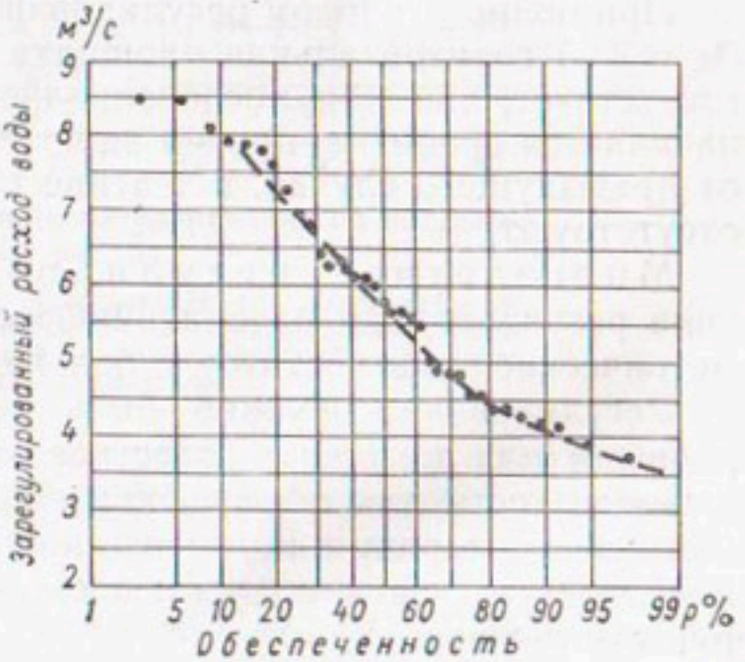


Рис. 33. Кривая обеспеченности зарегулированных расходов воды при заданной емкости водохранилища сезонного регулирования.

ются также в виде кривой обеспеченности, с которой непосредственно по значению P снимается искомый расход. Рассмотрим это на следующем примере Д. В. Кореництова [61].

Требуется определить обеспеченную равномерную отдачу для $P=90\%$ при регулировании стока реки полезной емкостью водохранилища не более 50 млн. м³. Норма стока $Q_0=11$ м³/с, $\Gamma_0=347$ млн. м³/год, $C_{вг}=0{,}35$, период наблюдений 35 лет.

Полезная емкость составляет $\beta_в=50:347=0{,}145$, т. е. около 15% объема стока за средний год. По таблицам С. И. Рыбкина при $C_{вг}=0{,}35$ и $P=90\%$ находим $K=0{,}59>0{,}145$. Значит, в данном случае возможно только сезонное регулирование стока с ежегодным заполнением и сработкой всей емкости при равномерной отдаче $Q_{зар}$ в период межени. Выполняя такое регулирование табличным способом (путем несложного подбора) или по интегральной кривой с использованием в каждом году всей емкости, получим 35 величин $Q_{зар}$, различных по годам в связи с неодинаковым притоком.

Располагая эти величины в убывающем порядке и пользуясь формулой (9), наносим их на клетчатку вероятностей (рис. 33) и проводим сглаживающую линию, которую принимаем за кривую обеспеченности зарегулированных расходов. По этой кривой при $P=90\%$ отдача брутто $Q_{зар}=4{,}1$ м³/с. Потери можно учесть сразу за весь год (см. табл. 29) или, более подробно, табличным способом по году с отдачей, близкой к полученной (подобно табл. 30).

Напомним, что наполнения *ae* (см. рис. 32 *а*) на каждый момент *c* отсчитываются от линии пустого водохранилища до линии регулирования. Они равны также разности между полной емкостью a_1b_1 и объемом сработки *ab*. Расходы же (зарегулированные, отличные от естественных) определяются по лучевому масштабу и контролируются расчетом — составлением элементарного водного баланса за конкретные отрезки времени.

На рис. 34, заимствованном из работы В. А. Бахтиарова [12], левые графики относятся к неглубокому сезонному регулированию, когда объем годового водопотребления $A_{бр}$ значительно меньше объема обеспеченного годового стока W_P. При этом ход наполнений водохранилища отличается горизонтальным участком в течение нескольких месяцев, что соответствует полному водохранилищу, работающему тогда на приточных расходах со сбросами. Различия между естественными и зарегулированными расходами для этого случая видны на рис. 34 *в*.

При полном годовом регулировании (правые графики на рис. 34, $A_{бр}=W_P$) горизонтальная площадка на графике наполнений почти отсутствует, так как после заполнения водохранилища сразу же начинается сработка, причем зарегулированные расходы, в отличие от предыдущего случая, в течение всего года постоянны, а сбросы отсутствуют.

Многолетнее регулирование. При расчетах этого вида регулирования рассматриваются не отдельные годы, а гидрометрические ряды достаточно большой длительности.

Регулирование должно быть бесперебойным в течение всего ряда лет или допускать известное число перебоев. Соответственно этому емкость для обеспечения заданного расхода принимается наибольшей в ряду или в известной мере ограничивается. Она должна наполняться и полностью срабатываться в течение рассматриваемого многолетия.

Приступая к регулированию, выполняем анализ многолетних колебаний стока. Для иллюстрации на рис. 35 приведен только 10-летний период [12]. Годы, 1, 2, 3-й, а затем 5, 6 и 10-й — многоводные или средние, так как копец каждого из этих лет на инте-

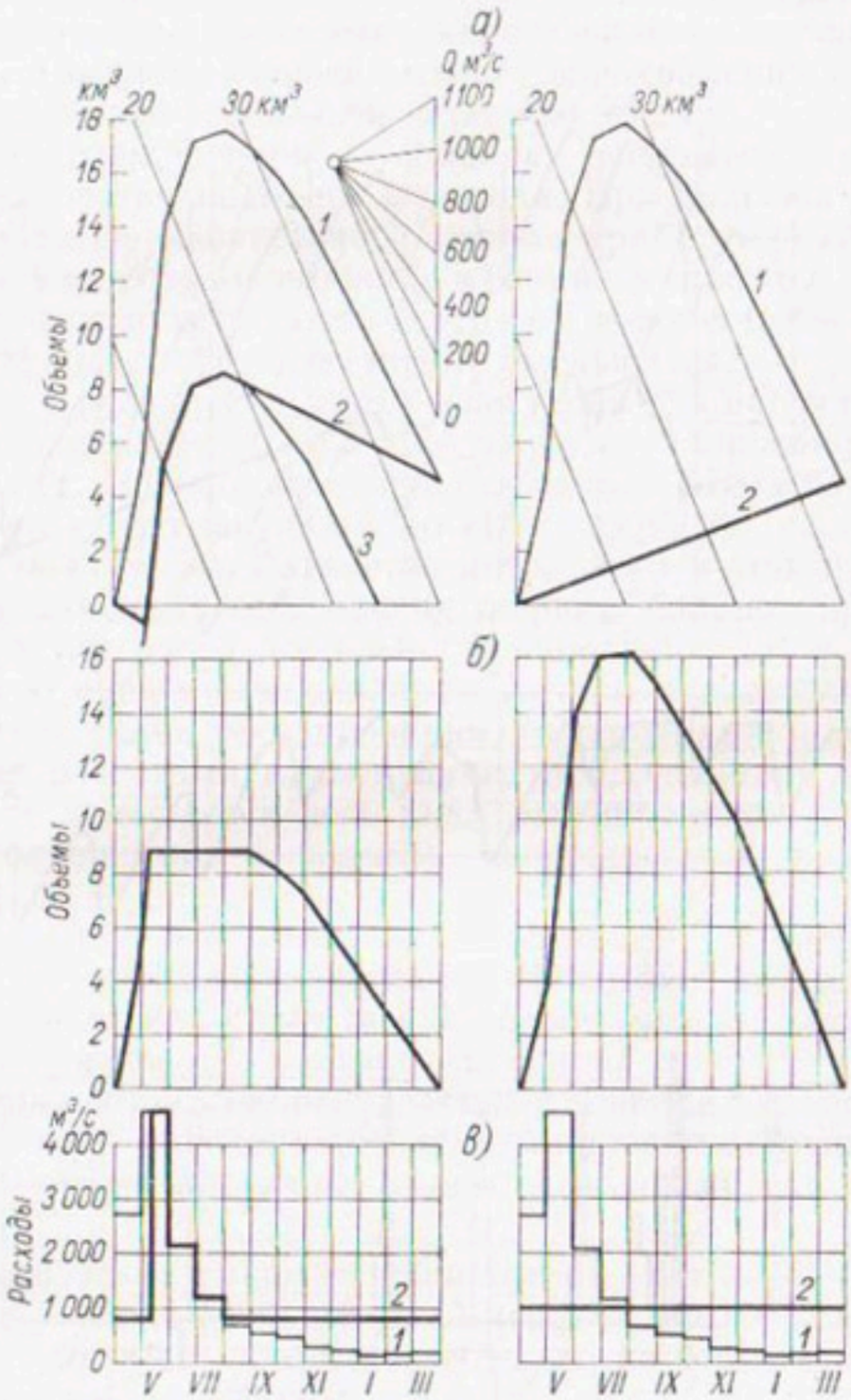


Рис. 34. Расчеты сезонного регулирования на постоянный расход.

а — интегральные кривые естественного (*1*), зарегулированного (*2*) стока и контрольная (*3*); *б* — графики наполнений водохранилища; *в* — графики естественных (*1*) и зарегулированных (*2*) расходов.

гральной кривой расположен выше начала или на одном уровне с ним. Поскольку отдача водохранилища не может превышать объема стока среднего года, то в указанные 6 лет ее можно обеспечить без затруднений, выравнивая внутригодовые колебания стока, для чего необходима сравнительно небольшая емкость.

Объемы стока за годы 4 и 7—9-й меньше нормы: конечные точки каждого из этих лет лежат на кривой ниже начальных. Очевидно, в пределах указанной маловодной 3-летки или 4-летки (включая низкую межень предшествующего, 6-го года) и находится тот критиче-

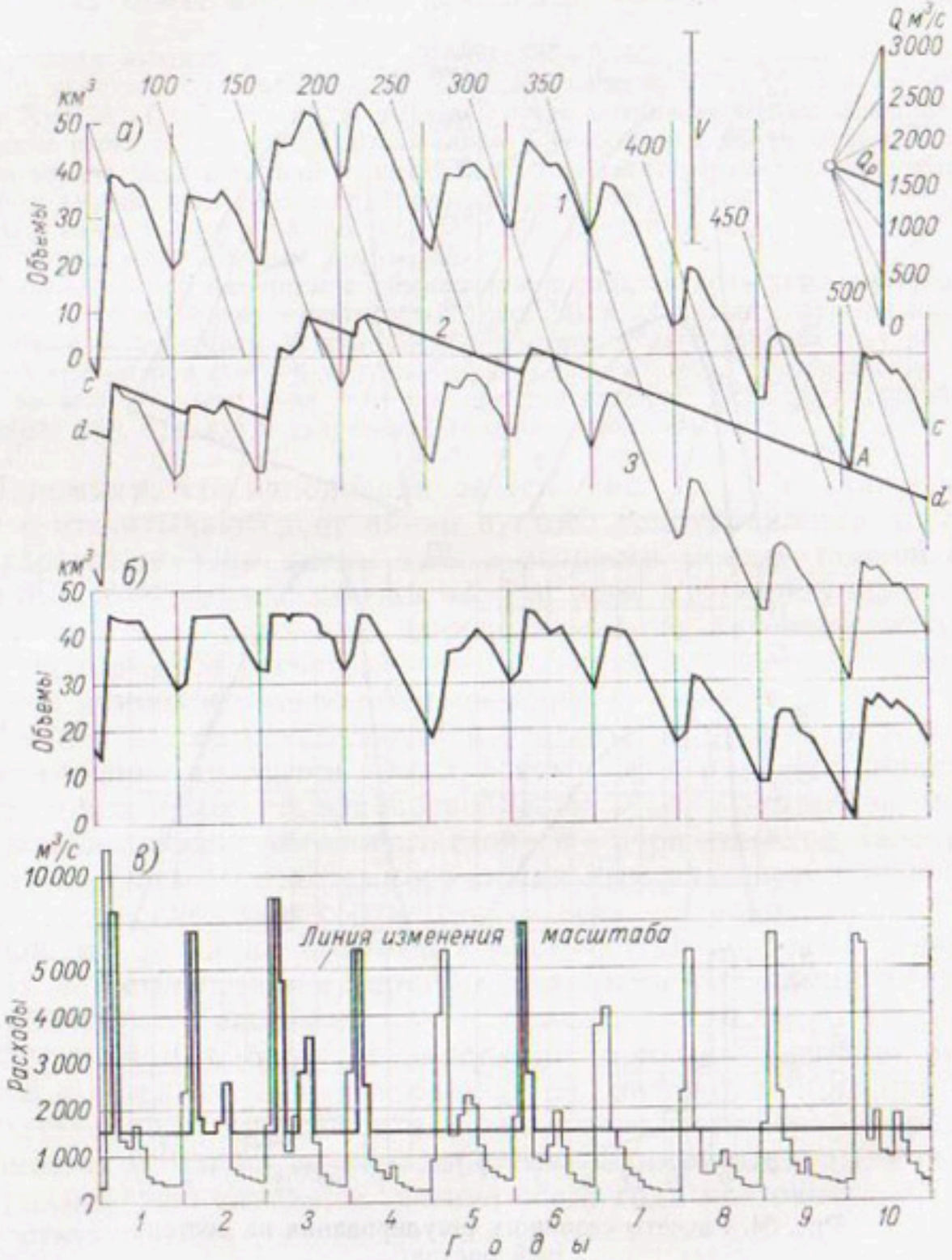


Рис. 35. Расчеты многолетнего регулирования на постоянный расход.

а — интегральные кривые естественного (*1*), зарегулированного (*2*) стока и контрольная (*3*); *б* — график наполнений водохранилища; *в* — графики естественных (*1*) и зарегулированных (*2*) расходов.

ский по стоку период, по которому определится искомая емкость при заданной отдаче или, наоборот, отдача при известной емкости. Для решения первой задачи проводится касательная к кривой полного водохранилища с наклоном соответственно заданному расходу.

Наибольшее расстояние между касательной и кривой в конце маловодья (в конце межени 9-го года) есть необходимая емкость водохранилища.

Очевидно, емкость будет наибольшей (т. е. искомой), если линия регулирования aA будет касаться кривой в вершине 6-го года. Все иные варианты проведения касательной (к вершине 4 и 7-го года и др.) требуют меньшей емкости водохранилища и потому не могут бесперебойно обеспечить заданную отдачу.

Таким образом, в период сработки вовлечены годы 7—9-й и межень предшествующего им 6-го года. При большей отдаче (т. е. меньшем наклоне касательной) период сработки может начаться с вершины 4-го года, и емкость в конце маловодья увеличится. С уменьшением отдачи точка касания переместится на вершину 7-го года, период сработки и емкость уменьшатся.

Определив полезную емкость и построив для наглядности линию пустого водохранилища, нанесем линию регулирования стока для остальных лет. Прежде всего найдем наполнение в конце многолетия, продлив касательную aA до конца периода, и перенесем емкость cd к началу его. Равенство начального и конечного объемов (cd) необходимо для соблюдения водного баланса при регулировании стока. От этого начального наполнения, т. е. от точки d, проводится с найденным наклоном луч до пересечения с нижней кривой. Затем линия регулирования, то совпадая с нижней кривой, то сохраняя известный наклон луча, продолжается до отправной точки a. Так замыкается весь цикл регулирования с неоднократными наполнениями и полным опорожнением водохранилища в точке A.

Вторая задача решается, так же начиная с маловодных периодов. Поскольку емкость известна, то линия пустого водохранилища может быть нанесена сразу же. В полосе между двумя кривыми проводится прямая aA, касающаяся линий полного и пустого водохранилища соответственно в начале и в конце маловодья. Наклоном касательной определяется зарегулированный расход. Остальные построения аналогичны вышеизложенному и показаны на рис. 35 *а*.

Хронологические графики наполнений, а также естественных и зарегулированных расходов приведены на рис. 35 *б*, *в*. На графиках видно, что в течение 5 лет сбросов не было и сохранялись только постоянные расходы. В остальные 5 лет водохранилище в половодье наполнялось до НПГ и работало со сбросами.

Третья задача сводится к построению зависимости $Q=f(V)$ путем определения необходимых полезных объемов для 3—4 значений зарегулированных расходов. Эта зависимость является продолжением аналогичной кривой при сезонном регулировании (рис. 32 *в*) и асимптотически приближается к норме стока. Значительные приращения емкости слабо влияют на зарегулированный расход с приближением его к норме. Это объясняется тем, что с ростом емкости увеличивается период сработки T (см. рис. 31). Поскольку приращение расхода ΔQ обратно пропорционально величине T, то

относительный эффект от приращения емкости понижается и в пределе (при $Q \cong \overline{Q}$) стремится к нулю, когда T стремится к бесконечности

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{T \to \infty} = 0.$$

Однако это не означает, что высокая степень регулирования менее выгодна, чем низкая. Экономические показатели зависят от стоимости повышения подпора, которая изменяется в зависимости от топографии и геологии чаши водохранилища и других местных условий.

В случаях полного выравнивания стока за многолетие должны отсутствовать перебои и сбросы. Оба условия удовлетворяются, если границами емкости будут самая верхняя и самая нижняя касательные к интегральной кривой, соответствующие норме стока.

В рассмотренные 10 лет емкость для полного выравнивания стока можно получить, проведя касательную к вершине кривой в 4-ом году с наклоном по норме стока. Наибольшая емкость определится также в конце 9-го года, т. е. в пределах двух параллельных касательных, ограничивающих кривую сверху и снизу. Период сработки увеличивается при этом до 6 лет.

Регулирование стока на ступенчатый график потребления. Во многих случаях водопотребление меняется в течение года. Коммунальное и промышленное водоснабжение отличается практически постоянным водопотреблением во все сезоны. Но нередко к нему в период вегетации (апрель—сентябрь или май—сентябрь) добавляется оросительное водопотребление. При транспортно-энергетическом регулировании стока должно обеспечиваться судоходство в нижнем бьефе во время навигации, а зимой — энергетика.

При этом регулирование проводится по жесткому ступенчатому графику потребления, согласованному с участниками водохозяйственного комплекса.

Расчеты и построения остаются по существу такими же, как и при регулировании стока на постоянный расход. Только лучи для большого и малого расходов Q_1 и Q_2 требуется проводить в пределах соответствующих сезонов каждого года. В примере (рис. 35 *а*) луч Q_1 от вершины 6-го года (начало маловодья) прошел бы до конца сезона большого потребления, где, делая перелом, линию регулирования должен продолжить луч Q_2 до конца сезона малого потребления, потом снова Q_1 и т. д.

Такие же построения можно выполнять и в обратном порядке, от конца маловодья. Наибольшее отклонение линии регулирования от интегральной кривой в пределах лимитирующего маловодья даст необходимую емкость водохранилища. Построения продолжаются до конца периода, а затем, после выявления конечной емкости, с начала ряда до начала лимитирующего маловодья.

Сезонное регулирование стока на ступенчатый график потребления также остается без существенных изменений, кроме замены

одного луча для всего года двумя лучами соответственно водопотреблению по сезонам года.

Многолетняя характеристика сезонного регулирования (при найденной емкости по расчетному году) дается непрерывным регулированием, от года к году, соответственно изложенному.

Табличный расчет регулирования стока

Наряду с расчетами по интегральной кривой и для контроля их основных результатов (расчет емкости, глубины перебоев и т. п.) применяется табличный способ расчета, который сводится к решению уравнения водного баланса по отрезкам времени Δt. При этом уравнение баланса имеет вид

$$Q_{\text{а}}\,\Delta t = \pm \Delta V = (Q_{\text{пр}} - Q)\,\Delta t = [Q_{\text{пр}} - (Q_{\text{и}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{п}})]\,\Delta t, \qquad (32)$$

где $Q_{\text{а}}$ — расход аккумуляции, т. е. разность притекающего $Q_{\text{пр}}$ и зарегулированного (брутто) Q расходов; ΔV — изменение емкости водохранилища (плюс — при увеличении ее, минус — при сработке); $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{с}}$, $Q_{\text{п}}$ — расходы соответственно используемый, сбросной и уходящий на потери воды из водохранилища.

В зависимости от необходимой точности и интенсивности изменения притока расчет выполняется за время половодья по пятидневкам или декадам, а за остальное время года — обычно по месяцам (при вероятностных расчетах по сезонам, см. § 14).

Расчеты ведутся для всего принятого ряда лет по средним расходам в указанные отрезки времени. Последовательность расчетов остается той же, что и по интегральным кривым.

Если задано водопотребление и надо определить емкость водохранилища, то при многолетнем регулировании (как и при сезонном) расчет начинают с конца наиболее резкого и длительного маловодья, когда наполнение принимается равным мертвому объему. Водный баланс подсчитывается с конца к началу каждого интервала, переходя от последнего к предыдущему и т. д. в порядке, обратном ходу времени. Расчет продолжается до начала маловодного периода, а таблица заполняется снизу вверх. Полученное при этом наибольшее наполнение есть искомая общая емкость водохранилища.

Зная общую емкость, продолжаем расчет уже по ходу времени (по таблице сверху вниз), но опять же от мертвого объема:

а) при сезонном регулировании — от начала водохозяйственного года до заполнения найденной емкости. С этого момента и далее, до начала сработки, водохранилище заполнено и работает на расходах притока;

б) при многолетнем регулировании — от начала предыдущего расчета (конец маловодья) до заполнения емкости и далее до конца всего периода. Отдача соблюдается заданной при наличии сработки и равной приточным расходам (при заполненной емкости). Полученная в конце всего периода остаточная емкость переносится к началу всего периода. Отсюда, соблюдая тот же режим,

Таблица 21

Расчет регулирования стока

Год	Сезон	К началу сезона		Объем испарения, 10^6 м³	Объем фильтрации, 10^6 м³	Объем водопотребления, 10^6 м³	Убыль воды из водохранилища, 10^6 м³	Приток воды в водохранилище, 10^6 м³	К концу сезона		Сброс воды, 10^6 м³
		объем воды в водохранилище, 10^6 м³	общая площадь зеркала, 10^6 м²						объем воды в водохранилище, 10^6 м³	отметка горизонта воды, м	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1920	Весна (III—IV)	0	0	2,9	5,5	100	108	859	548	92,0	203,0
	Лето 1-е (V—VI)	548	122	20,9	10,3	100	131	69,5	486	91,5	—
	Лето 2-е (VII—IX)	486	114	41,6	12,6	150	204	74,7	357	90,2	—
	Осень (X—XI)	357	103	5,5	6,4	100	112	35,5	281	89,4	—
1920-21	Зима (XII—II)	281	81	—5,2	7,3	150	152	77,5	206	88,4	—
1921	Весна (III—IV)	206	68	3,3	6,8	100	110	380	476	91,4	—
	Лето 1-е (V—VI)	476	111	18,7	8,7	100	127	42,8	392	90,6	—
	Лето 2-е (VII—IX)	392	99	34,7	9,3	150	194	33,2	231	88,7	—
	Осень (X—XI)	231	73	4,1	3,8	100	108	27,8	151	87,6	—
1921-22	Зима (XII—II)	151	58	—3,4	3,4	150	150	70,7	72	85,7	—
1922	Весна (III—IV)	72	33	3,2	6,2	100	109	594	548	92,0	9,0

расчет продолжается до того момента, где он закончился при определении емкости водохранилища.

Если его емкость и водопотребление известны, расчеты упрощаются. Сначала находим остаточный объем в конце всего периода. Для этого выбираем ближайшее к нему обильное половодье, в которое водохранилище безусловно заполняется (судя по объемам воды). Отсюда, начиная с полного водохранилища и соблюдая его режим по изложенному выше, выполняем расчет до конца периода. Остаточный объем переносится на начало периода, и расчет продолжается до исходного момента.

Пример. Произведем расчет регулирования стока по хронологическому ряду лет для водоснабжения промышленного района с постоянным водопотреблением $50 \cdot 10^6$ м³/мес. (нетто).

Расчетная высота потерь на испарение за год и по сезонам указана в табл. 17. Потери на фильтрацию равны 1% наличного объема водохранилища за месяц (за сезон из двух месяцев равны 2% среднего объема в этот сезон).

Сток маловодного 1921-22 г. (табл. 21, гр. 9) равен $554{,}5 \cdot 10^6$ м³, что меньше годового водопотребления даже без учета потерь. Предполагаем, что потери равны 15% отдачи брутто, причем отдача брутто должна составлять $50 \cdot 12 : 0{,}85 = 700 \cdot 10^6$ м³/год. Поэтому необходимо многолетнее регулирование.

Двухлетка (1920-21 и 1921-22 гг.), согласно расчетам, удовлетворяет заданной обеспеченности и удвоенной отдаче брутто.

Топографические характеристики чаши водохранилища показаны на рис. 14. Требуется установить полезный и мертвый объемы, отметку ГМО и режим работы водоема в указанное двухлетие при НПГ=92 м. Для краткости расчет выполняем по сезонам.

Объемы водохранилища определены подбором, путем составления водного баланса в каждом сезоне.

Весной 1920 г. водоем наполняется (со сбросами). Дальнейший расчет ведется в следующем порядке:

а) приближенно находим объем потерь на испарение и фильтрацию (например, по площади и объему водохранилища в начале сезона) и, определив потребление брутто (табл. 21, гр. 8), находим с учетом притока в водохранилище объем в конце сезона;

б) определяем средний объем $V_{ср} = (V_{нач} + V_{кон}) : 2$ и соответствующую ему площадь, по которым уточняем потери;

в) по уточненным потерям пересчитываем потребление брутто и снова находим конечный и средний объемы водохранилища (обычно второе приближение дает требуемый результат, так как дальнейшие уточнения среднего объема за сезон незначительны);

г) полученный после уточнения конечный объем водоема в одном сезоне является начальным для следующего сезона и т. д.

Искомая в примере регулирующая емкость равна $548 - 72 = 476 \cdot 10^6$ м³, отметка ГМО=85,7 м. По табличным данным можно судить об изменении основных элементов режима работы установки.

Аналогичный расчет приведен в § 14 (см. табл. 30).

Использование обобщений при расчетах регулирования по календарному ряду стока

Сезонное (годовое) регулирование выполняется по изолированному году и по всему ряду лет. В первом случае все годы по стоку разделяются жесткими календарными датами от начала половодья до конца межени (обычно с округлением до целого месяца). Затем по статистическим параметрам годового стока ($Г_0$, $C_{вг}$, C_s, $P\%$)

находится обеспеченный объем стока за год $Г_P$. Таким же образом по параметрам стока за всю межень в жестких датах (например, за май—февраль), т. е. по величинам M_0, $C_{vм}$, $C_{sм}$, $P\%$, находится объем меженного стока заданной обеспеченности M_P.

Затем из фактического ряда выбирается год с объемом стока за год, примерно равным $Г_P$, и за межень M_P. В выбранном году сток за межень должен совпадать или быть близким к M_P, а сток за весну равен разности между годовым стоком и величиной меженного стока.

Понятно, что если годовой и меженный сток в году совпадают соответственно с величинами $Г_P$ и M_P, то весенний сток этого года не удовлетворяет заданной обеспеченности. Но это не нарушает расчетных условий.

Регулирование стока в выбранном году производится балансированием по месяцам стока, потребления и потерь и выполняется в следующем порядке.

К началу весны (начало расчета) водохранилище принимается пустым; в течение весны оно наполняется за счет излишков стока над потреблением и потерями; затем с наступлением межени, когда потребление и потери превышают сток, происходит сработка водохранилища. Если емкость не преувеличена, то в конце межени (конец расчета) водохранилище становится пустым. Можно также регулирование проводить от полного водохранилища к началу межени и заканчивать наполнением его к концу весны.

Как видно из приведенного, при неполном годовом регулировании стока по изолированному году обеспеченность отдачи водохранилища определяется обеспеченностью стока межени, причем весной в выбранном году происходит сброс воды из водохранилища. При полном годовом регулировании обеспеченная отдача равна обеспеченному стоку за год в целом, причем сброса весной не наблюдается. Величина потребной рабочей емкости при этом зависит также от обеспеченного стока межени.

Регулирование стока по всему многолетнему ряду проводится не по всем, а только по маловодным годам и по годам с маловодной меженью, сомнительным в смысле удовлетворения потребности в воде. Годы, очевидные по бесперебойности водоснабжения, учитываются, но не регулируются. При этом емкость считается достаточной, если обеспеченность бесперебойного водоснабжения, определенная по формуле (9) или (10), равна или больше заданной.

Если регулирования в пределах года недостаточно для покрытия потребности в воде с заданной обеспеченностью, то в регулирование вовлекаются два-три года и более, т. е. переходят к многолетнему регулированию.

Многолетнее регулирование по фактическому стоковому ряду выполняется аналогично вышеизложенному.

Рассматривается обеспеченность стока нескольких маловодных n-летий. Для расчета принимается то n-летие, которое имеет несколько бóльшую обеспеченность, чем заданная, так как при мно-

голетнем регулировании обеспеченность отдачи водохранилища несколько меньше обеспеченности стока за n-летие (см. § 11).

Если сток за рассматриваемое n-летие при регулировании не удовлетворяет заданного водопотребления, выбирается более длительное n-летие, также с повышенной обеспеченностью стока. При этом переход к более длительному n-летию вызывается тем, что при одной и той же обеспеченности стока меньшего и большего n-летия среднегодовой сток во втором n-летии больше, чем в первом.

Обеспеченность стока n-летия относится к группе целых лет, а сток за дополнительную межень оценивается особо (см. § 12).

Пусть, например, рассматривается n-летие из двух целых лет плюс межень. Обеспеченность водности осредненного годового стока двухлетней группы из расчета

$$W_{\text{ср}}^{(2)}=\frac{W_1+W_2}{2} \text{ и } K_{\text{ср}}^{(2)}=\frac{W_{\text{ср}}}{W_0}$$

определяется по таблицам С. И. Рыбкина при $C_v^{(2)}=C_v:\sqrt{2}$ и $C_s^{(2)}=2C_v^{(2)}$.

Здесь W_0 (объем) — норма годового стока, C_v — коэффициент изменчивости годового стока.

Емкость водохранилища, необходимая по n-летию, имеющему повышенную обеспеченность и достаточному для покрытия водопотребления, является искомой. При регулировании по всему ряду лет подбор емкости производится аналогично годовому регулированию с применением формул (9) и (10) для определения обеспеченности отдачи.

В заключение отметим, что расчеты по стоковому ряду, особенно с использованием интегральных кривых, позволяют проследить получаемые результаты, в наилучшей мере их откорректировать и построить хронологические графики, а также кривые обеспеченности наполнений, полезной отдачи, сбросов и т. п. Графики хода этих элементов отчетливо характеризуют режим работы установки. Однако при всей своей простоте метод расчета по фактическому календарному ряду стока приводит к более или менее случайным решениям (см. § 9).

Как показали В. Г. Андреянов и др. [9], распределение вероятностей n-летий при моделировании весьма длительных рядов дает вполне устойчивую закономерность. Последняя, однако, становится неустойчивой, если, например, от 1000-летних переходить к более коротким рядам: 200-летним и тем более 100-летним. Это означает, что те маловодные n-летия, которые мы по данным 40—60-летнего ряда обычно принимаем для иллюстрации критических условий работы установки, являются довольно случайными. Элементы случайности в получаемых результатах в значительной мере могут быть исключены применением обобщенного метода расчетов.

Глава V

ОБОБЩЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ВОДООТДАЧИ

Работа водохранилища отражает взаимодействие двух различных по своей природе факторов [61]: а) стока, многолетние колебания которого можно описать приемами теории вероятностей; б) потребления воды, определяемого народнохозяйственным планом.

Для оценки результатов работы установки, например ее отдачи и т. п., применяются два вида приемов вероятностных обобщений (см. § 4, 9). К первому виду относятся приемы, в основе которых лежит исходное распределение вероятностей естественного речного стока, не искаженного искусственными ограничениями. Приемами второго вида обобщаются вероятности итоговой продукции установки — зарегулированные расходы, мощности и т. п., полученные по наличному ряду величин стока.

Поскольку распределение вероятностей объемов стока достаточно четко описывается лишь за целые годы и полные фазы (например, половодье, межень), то первый вид обобщений преимущественно применяется при многолетнем и глубоком сезонном (для всей межени) регулировании стока.

При низких степенях регулирования стока, когда период сработки водохранилища охватывает лишь часть межени, непостоянен по годам и перемещается по срокам начала и конца маловодья, используется второй вид обобщений, относящихся не к стоку, а к результатам расчета по гидрометрическому ряду. Однако методика этого вида обобщений еще недостаточно разработана. Такое разделение сфер применения двух видов обобщений объясняется также и их принципиальными особенностями. При низких степенях регулирования работа водохранилища в каждом году обусловливается только режимом стока этого года, независимо от водности предшествующих лет. Заполнение емкости обеспечивается каждым, даже низким (в пределах расчетной обеспеченности), половодьем. Выборка величин отдачи, глубины сработки и т. п. охватывает столько независимых членов ряда, сколько лет в периоде наблюдений по стоку. При наличии нескольких десятков членов ряда можно получить представление о вероятностях изучаемой величины.

При многолетнем регулировании критические периоды составляются из нескольких смежных маловодных лет. Число независимых членов выборки, например отдач водохранилища, меньше числа лет исходного ряда. При степенях регулирования, близких к $\alpha=1$, это настолько ощутимо, что исключается возможность сколько-нибудь достоверного суждения о вероятности бесперебойной работы установки непосредственно по данным расчета за несколько десятилетий. Требуется исследовать повторяемость различных теоретически мыслимых сочетаний стока, что выполняется на основе теории вероятностей. Поэтому вероятностные методы сперва стали применяться при расчетах многолетнего регулирования стока.

Вначале для удобства расчетов и анализа результатов роль сезонной периодичности стока исключалась, в связи с чем полезную емкость водохранилища делят на две составляющие — многолетнюю $V_м$ и сезонную (годовую) $V_с$, каждая из которых определяется независимо друг от друга.

В итоге полезный объем

$$V_п = V_м + V_с,$$

общий объем

$$V_о = V_м + V_с + V_{м.о}.$$

Многолетняя составляющая емкости $V_м$ есть объем, необходимый для выравнивания годовых величин стока, который при этом учитывается как равномерный в каждом году и изменяющийся только от года к году. Сезонная составляющая $V_с$ представляет величину, которая должна быть добавлена к $V_м$ для того, чтобы учесть фактическую внутригодовую неравномерность стока и соблюсти заданную обеспеченность отдачи $A_{бр}$. При $A_{бр} \leqslant \Gamma_P$ потребность в объеме $V_м$ отпадает, и мы переходим к сезонному регулированию.

В дальнейшем был разработан прием расчета всей полезной емкости водохранилища, без разделения на составляющие. Оба эти приема рассмотрены в § 11, 12, 13.

§ 11. МЕТОДЫ РАСЧЕТА МНОГОЛЕТНЕЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА И РАСЧЕТНЫЕ ГРАФИКИ

Первый метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля и сложение кривых обеспеченности

Применение обобщений в водохозяйственных расчетах в СССР начато с появлением в 1930 г. первого метода расчета регулирования стока С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [60].

Потребная многолетняя составляющая емкости водохранилища по этому методу устанавливается путем математической дедукции, исходя из распределения вероятностей стока, осредненные значения

которого для различных n-летий находятся (при заданной обеспеченности P и принятом коэффициенте асимметрии C_s) в зависимости от n и изменчивости годового стока C_v.

Исходным является средний годовой сток:

по годам:

$$K_1,\ K_2,\ K_3,\ \ldots,\ K_N;$$

2-летиям:

$$\frac{K_1+K_2}{2},\ \frac{K_2+K_3}{2},\ \ldots,\ \frac{K_{N-1}+K_N}{2};$$

3-летиям:

$$\frac{K_1+K_2+K_3}{3},\ \frac{K_2+K_3+K_4}{3},\ \ldots,\ \frac{K_{N-2}+K_{N-1}+K_N}{3};$$

. . . . . .

n-летиям:

и т. д.

Полученные ряды (и подобные им для стока половодий и т. п.) издавна анализируются и нередко еще и теперь применяются в различных расчетах. В частности, для каждого из них путем статистической обработки можно найти коэффициент $C_v^{(n)}$ и соответствующий ему обеспеченный годовой, средний за n-летие, сток $K_p^{(n)}$ (по таблице Крицкого—Менкеля или Рыбкина).

Не прибегая к статистической обработке, изменчивость стока n-летий $C_v^{(n)}$ и соответствующий им осредненный сток $K_p^{(n)}$ можно найти по соотношениям:

$$C_v^{(n)}=\frac{C_v}{\sqrt{n}}=\varphi(n), \tag{33}$$

$$C_s^{(n)}=\frac{C_s}{\sqrt{n}}=\varphi(n), \tag{33'}$$

$$K_p^{(n)}=\varphi'\left(C_v^{(n)}\right)=\varphi''(n). \tag{33''}$$

Многолетний объем водохранилища $\beta_м$ принимается равным наибольшему из ряда n-летий дефициту D при водопотреблении α или наибольшей разности между потреблением и притоком за n-летие, которая должна быть компенсирована целиком заполненным к началу n-летия водохранилищем, т. е.

$$\beta_м=D=\left(\alpha-K_P^{(n)}\right)n. \tag{33'''}$$

Это n-летие, показывающее величину многолетней составляющей емкости водохранилища и продолжительность ее сработки, называется критическим ($n_{кр}$ лет).

В примере расчета (табл. 22) искомые $\beta_м$ (жирные цифры) стоят в одной строке с $n_{кр}$.

Указанные особенности расчета имеют принципиальное значение, нашедшее отражение в ряде последующих работ [105] и др.

С. И. Рыбкин [105] по рассмотренному методу построил монограммы для $\beta_м$ и $n_{кр}$ при $C_s = 2C_v$ и P, равных 90, 95 и 97%.

Первый метод Крицкого и Менкеля был не вполне строг, так как отождествлял обеспеченности стока и водоотдачи.

По веществу же неточность рассматриваемого приема состоит в следующих допущениях: 1) опорожнение водоема может быть только в конце установленного критического периода n, 2) опорожнение непременно произойдет в конце такого периода, если сток его меньше или равен расчетной величине, соответствующей заданной обеспеченности.

Перебои могут быть при маловодных периодах различной продолжительности. Критическая длительность n не является единственно возможным сроком полной сработки водохранилища. Перебой может наступить не только в периоды, выходящие по своей водности за пределы расчетной обеспеченности, но и в критические, т. е. по расчету бесперебойные периоды, причем не в конце их, а ранее. Так будет обстоять дело в том случае, если первые годы n-летия отличаются резкой маловодностью, а последний год может покрыть годовую потребность с избытком.

Указанные случаи возможны потому, что сток за критическое n-летие учитывается осредненно за все годы n-летия. Фактически же распределение стока по годам n-летия может быть самым разнообразным.

По данным табл. 22, для $\alpha = 0{,}75$ требуется многолетняя емкость $\beta_м = 0{,}648$, которая исчерпывается к концу третьего года (критический период равен 3 годам; к нему добавляется длительность межени, в течение которой работает сезонная емкость).

Таблица 22

Определение многолетней емкости водохранилища $\beta_м = D = (\alpha - K_p^{(n)})n$ по первому методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1930 г.) при $C_v = 0{,}50$, $C_s = 2C_v$, $P = 97\%$

Критический период $n_{кр}$ лет	Коэффициент вариации $C_p^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}$	Средний за n-летие годовой сток $K_p^{(n)}$	Коэффициент регулирования стока α							
			0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
1	0,50	0,288	**0,162**	**0,212**	**0,262**	**0,312**	0,362	0,412	0,462	0,512
2	0,353	0,450	—	0,100	0,200	0,300	**0,400**	**0,500**	0,600	0,700
3	0,288	0,534	—	—	0,048	0,198	0,348	0,498	**0,648**	0,798
4	0,25	0,588	—	—	—	0,048	0,248	0,448	0,648	0,848
5	0,224	0,625	—	—	—	—	0,125	0,375	0,625	**0,875**
6	0,204	0,655	—	—	—	—	—	0,270	0,570	0,870

Осредненный годовой приток для расчетного 3-летия $K = 0{,}534$. Имея к наступлению критического периода наполненное водохранилище, баланс для всего 3-летия как раз соблюдается: $0{,}648 + 3 \cdot 0{,}534 = 3 \cdot 0{,}75$. Однако если приток будет составлять не $\Sigma K = 0{,}534 + 0{,}534 + 0{,}534 = 1{,}602$, а, например, $\Sigma K = 0{,}375 + 0{,}375 + 0{,}852 = 1{,}602$, то уже в конце второго года наступит перебой, так как $0{,}648 + 0{,}375 + 0{,}375 - 2 \cdot 0{,}75 = -0{,}102$.

Точно так же в конце бездефицитного в целом n-летия может быть перебой, если последний год или годы весьма маловодны. Поэтому нельзя ограничиваться исследованием критических периодов только определенной продолжительности. В таком случае обеспеченность водоотдачи несколько меньше обеспеченности стока.

Строгое соответствие между α, $\beta_м$ и P получается при расчете по второму (1935 г.), более совершенному методу тех же авторов [61], основанному на принципе сложения кривых обеспеченности стока.

Этот принцип и дальнейшее его развитие в работах 1940 г. [61, 103, 106] излагаются ниже.

Пусть требуется построить кривую обеспеченности сумм $z=x+y$, причем величина x (рис. 36 *а*) задана в виде непрерывной кривой обеспеченности $x=f(s)$, а кривая y имеет ступенчатую форму со значениями ступенек y_1, y_2, ... и с их частными вероятностями соответственно Δt_1, Δt_2, ..., причем $\Sigma \Delta t=1{,}0$ (рис. 36 *б*). Суммы будут равны $z_1=x+y_1$, $z_2=x+y_2$ и т. д.; вероятность, или доля этих частных сумм из общего их числа, равна: первой суммы Δt_1, второй Δt_2 и т. д. Кривые обеспеченности этих сумм, называемые частными кривыми обеспеченности, получаются из непрерыв-

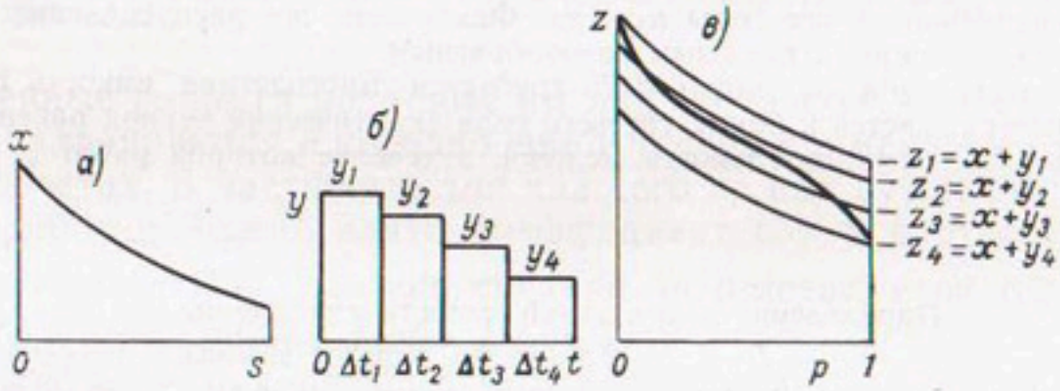


Рис. 36. Суммирование кривых обеспеченности.

ной кривой x повышением всех ее ординат в первой сумме на y_1, во второй — на y_2 и т. д.

Обеспеченность P произвольно выбранной суммы z через обеспеченности частных сумм равна P_1 в ряду $x+y_1$ и P_2 в ряду $x+y_2$. Общая обеспеченность P суммы z в общем ряду тех и других сумм будет

$$P_z=P_1\Delta t_1+P_2\Delta t_2+\ldots=\Sigma P_i\Delta t_i. \qquad (34)$$

Если $\Delta t=\frac{1}{m}$, где m — число равных интервалов, то $P_z=\frac{1}{m}\Sigma P_i$.

Определив для нескольких z соответствующие абсциссы P_z, строим общую кривую обеспеченности сумм (жирная линия на рис. 36 *в*).

Если же кривая обеспеченности y также есть плавная кривая, то для каждого z

$$P_z=\int_{t=0}^{t=1} P(t)\,dt, \qquad (35)$$

где $P(t)$ — функция от t, особая для каждого z. Для данной суммы z каждой (i-той) частной суммарной кривой z_i на рис. 36 *в* соответствует обеспеченность P_i. В то же время величине y_i частной кривой на рис. 36 *б* удовлетворяет конкретное значение t_i (от 0 до 1,0). Устанавливая для данного z значения P_i и t_i, соответствующие каждой из частных суммарных кривых, можно построить график $P_i=f(t_i)$.

По формуле (35) можно определить площадь, заключенную между этим графиком и осями координат P и t. Очевидно, средняя ордината графика $P_i=f(t_i)$ также дает величину P_z.

Построив для нескольких z такие графики и определив соответствующие им P_z, можно получить искомую кривую обеспеченности $z=f(P_z)$ как результат сложения двух кривых.

Практически сложение кривых обеспеченности уподобляется рассмотренному примеру, в котором вторая кривая — ступенчатая.

Основание кривой y делится на m равных интервалов и для границ всех интервалов Δt_i определяются y_i, число которых $m+1$. Затем, в принципе, следует построить частные кривые сумм $z_i=x+y_i$ и по ним для нескольких значений z (в пределах возможного их диапазона) найти P_i.

Далее по формуле трапеций

$$P_z=\frac{1}{m}\left(\frac{P_0}{2}+P_1+P_2+\ldots+\frac{P_m}{2}\right) \qquad (35')$$

для каждого значения z определяется P_z.

Для сокращения и ускорения расчетов и повышения их точности построение частных кривых сумм (и сопутствующие ему

Таблица 23

Расчет абсцисс суммарной кривой $z=f(P\%)$ при сложении кривой обеспеченности годового стока $x=f(P\%)$ и ее участка $y=f(T)$ в пределах от $K=\alpha=0{,}80$ до $K=\alpha-\beta_м=0{,}0$ ($\beta_м=0{,}8$) при $C_v=0{,}40$, $C_s=2C_v$, $z_{макс}=2\alpha=1{,}6$ и $z_{мин}=2\alpha-\beta_м=0{,}80$. Длина участка по оси абсцисс принимается за 100% (или за 1,0)

y_i	Δt_i	$z_{макс}=1{,}60$			$z=1{,}25$			$z_{мин}=0{,}80$		
		$x_i=z-y_i$	$P_i=P_x$	$\Delta P_z=P_i\Delta t_i$	$x_i=z-y_i$	$P_i=P_x$	$\Delta P_z=P_i\Delta t_i$	$x_i=z-y_i$	$P_i=P_x$	$\Delta P_z=P_i\Delta t_i$
0,80	0,167	0,80	65,35	10,89	0,45	95,0	15,83	0,0	100	16,67
0,69	0,333	0,91	54,0	18,0	0,56	88,0	29,3	0,11	100	33,33
0,55	0,250	1,05	40,5	10,13	0,70	76,4	19,1	0,25	99,7	24,93
0,46	0,125	1,14	32,5	4,06	0,79	66,5	8,30	0,34	98,7	12,33
0,39	0,083	1,21	26,8	2,22	0,86	58,9	4,89	0,41	97,0	8,05
0,19	0,042	1,41	15,0	0,63	1,06	39,3	1,65	0,61	83,8	3,52
	1,00		$P_z=45{,}93$			$P_z=79{,}07$			$P_z=98{,}83$	

ошибки) можно исключить. Для этого частные обеспеченности P_i нужно находить по основной кривой x для значений $x_i = z - y_i$. Очевидно, P_i будут одинаковыми, возьмем ли их по кривой сумм $z = x_i + y_i$ при данном z или по основной кривой x для разностей $x_i = z - y_i$.

Выгода по объему расчетов и их точности достигается также неравномерной разбивкой кривой y: участки с малой кривизной делятся на большие интервалы, и наоборот. Крайние ординаты получают вес половины примыкающих интервалов, промежуточные — по половине справа и слева. Сумма весов $\sum \Delta t = 1{,}0$.

Сама кривая $z = f(P\%)$, как показано ниже, бывает необходима не по всей ее длине, а только для ограниченной амплитуды z, в пределах от $z = n\alpha$ до $z = n\alpha - \beta_м$ (n — число лет данного n-летия).

Координаты искомой кривой определяются в последовательности, очевидной из табл. 23.

Для построения суммарной кривой получено три точки: z_1 (1,6; 45,93), z_2 (1,25; 79,07), z_3 (0,8; 98,83).

Второй метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1935 г.)

Многолетняя емкость $\beta_м$ является необходимой и достаточной, если отдача водохранилища α удовлетворяет при этом заданной обеспеченности P, т. е. число перебойных случаев не превышает допустимого. Перебои создаются не только отдельными изолированными очень маловодными годами, но и сочетаниями сомнительных лет с предшествующими годами: одним, двумя, тремя и т. д. Годы названы сомнительными, потому что сами по себе (при наличии к началу года заполненной емкости $\beta_м$) они не являются перебойными, и отнесение каждого из этих лет к обеспеченным или необеспеченным (перебойным) годам определяется ходом стока предшествующих лет.

Рассмотрим все возможные случаи перебоя в работе водохранилища по обеспечению его гарантированной отдачи.

Прежде всего перебойными будут те годы, объем стока которых K (в долях от среднемноголетнего стока за год) недостаточен для обеспечения отдачи даже при использовании в течение года всей емкости $\beta_м$, если бы она была заполненной к началу года.

Очевидно, такими годами, независимо от предшествующих лет, будут те, для которых

$$K_i + \beta_м < \alpha \text{ или } K_i < \alpha - \beta_м.$$

Число таких лет обозначим через s_1. Кроме этих, возможны перебои, которые вызываются не изолированным годом, а комбинацией его с предшествующим.

Из числа исследуемых лет необходимо исключить s_1 лет с перебоями. Но независимо от маловодности предшествующих лет не могут быть перебойными многоводные годы K_i, обеспечивающие отдачу α даже при пустом водохранилище в начале года. К числу

таких лет, которые обозначим через A_1, относятся годы со стоком $K_i > \alpha$.

Очевидно, совместно с предшествующим годом должны рассматриваться сомнительные годы, сток которых

$$\alpha > K_i > \alpha - \beta_м.$$

Сомнительные годы, обозначенные числом N_2, не дают перебоя при изолированном их рассмотрении, но могут дать перебой при маловодных предшествующих годах. Значит, группа N_2 состоит из обеспеченных и необеспеченных лет. Количество тех и других лет из этой группы следует выявить.

Понятно, что

$$N_2 = N - (s_1 + A_1),$$

где N — общее число лет рассматриваемого ряда.

Условием перебойности для парных комбинаций из смежных лет этой группы будет неравенство

$$K_i + K_{i-1} < 2\alpha - \beta_м.$$

Здесь $(K_i + K_{i-1})$ — суммарный сток за 2-летие из данного года K_i и одного предшествующего ему (K_{i-1}). Число лет, дающих перебои в комбинации с предшествующим годом, обозначим через s_2.

Таким же образом можно выяснить, сколько лет дадут перебои в комбинации с двумя предыдущими годами. Для этого следует из общего числа лет N исключить дополнительно (кроме s_1) годы s_2 как уже учтенные. Кроме того, должны быть исключены такие годы, которые совместно с одним предшествующим годом обеспечивают необходимую отдачу без использования водохранилища. К этой группе относятся годы со стоком K_i, если

$$K_i + K_{i-1} > 2\alpha.$$

Пусть число таких лет будет A_2.

Следовательно, для рассмотрения совместно с двумя, тремя предшествующими годами и т. д. остаются годы со стоком

$$2\alpha > K_i + K_{i-1} > 2\alpha - \beta_м.$$

Число таких сомнительных лет равно

$$N_3 = N_2 - (s_2 + A_2).$$

Из этих лет совместно с двумя предшествующими годами, согласно вышеизложенному, перебои дадут годы s_3, для которых

$$K_i + K_{i-1} + K_{i-2} < 3\alpha - \beta_м.$$

Таким образом, вся группа лет N_2 сортируется до конца на обеспеченные и необеспеченные годы.

Суммируя числа $s_1+s_2+\ldots$, находим общее число перебойных лет за исследуемый календарный стоковый ряд.

Порядок подсчета числа перебойных лет показан в табл. 24.

Таблица 24

Расчет обеспеченности отдачи водохранилища на р. Южном Буге у с. Богдановки при $\alpha=0{,}7$ и $\beta_м=0{,}3$

Календарный год	Годовой сток K_i	$K_i \leqslant \alpha-\beta_м=0{,}4$	$K_i > \alpha=0{,}70$	$K_i+K_{i-1}=\sum_{1}^{2} K$	$\sum_{1}^{2} K \leqslant 2\alpha-\beta_м=1{,}1$	$\sum_{1}^{2} K > 2\alpha=1{,}40$	$K_i+K_{i-1}+K_{i-2}=\sum_{1}^{3} K$	$\sum_{1}^{3} K \leqslant 3\alpha-\beta_м=1{,}8$	$\sum_{1}^{3} K > 3\alpha=2{,}10$
1916	1,14	—	1,14	—	—	—	—	—	—
1917	0,46	—	—	1,60	—	1,60	—	—	—
1918	0,63	—	—	1,09	1,09	—	—	—	—
1919	1,49	—	1,49	—	—	—	—	—	—
1920	0,22	0,22	—	—	—	—	—	—	—
1921	0,19	0,19	—	—	—	—	—	—	—
1922	0,63	—	—	0,82	0,82	—	—	—	—
1923	1,21	—	1,21	—	—	—	—	—	—
1924	0,66	—	—	1,87	—	1,87	—	—	—
1925	0,50	—	—	1,16	—	—	2,37	—	2,37

$N_1=10$, $s_1=2$, $A_1=3$; $N_2=5$, $s_2=2$, $A_2=2$; $N_3=1$, $s_3=0$, $A_3=1$.

Число перебойных лет $s=s_1+s_2+s=2+2+0=4$.

Число обеспеченных лет $A=A_1+A_2+A_3=3+2+1=6$.

Проверка по интегральной кривой показывает, что количество перебоев и годы их наступления точно совпадают с результатами аналитического подсчета, что и следовало ожидать.

Основываясь на изложенном, перейдем к выяснению обеспеченности работы водохранилища, если задана кривая обеспеченности годовых объемов стока, многолетняя емкость водохранилища $\beta_м$ и его отдача α.

Изолированные перебойные годы на кривой обеспеченности входят в зону

$$K < \alpha-\beta_м.$$

Относительное количество их по вероятности оценивается величиной

$$s_1=1-P_{\alpha-\beta},$$

где $P_{\alpha-\beta}$ — обеспеченность модульного коэффициента $K=\alpha-\beta_м$.

Выделяем на кривой обеспеченности зону сомнительных лет

$$\alpha > K > \alpha-\beta_м.$$

Относительное количество их по вероятности оценивается величиной

$$N_2 = P_{\alpha-\beta} - P_{\alpha},$$

где P_{α} — обеспеченность модульного коэффициента $K=\alpha$. Годы с $K>\alpha$ неперебойны.

Чтобы определить, какое число лет из сомнительной группы даст перебои с одним предшествующим годом, надо построить кривую обеспеченности суммарных объемов стока за 2-летия из одного года группы N_2 и одного предшествующего (любого) года по исход-

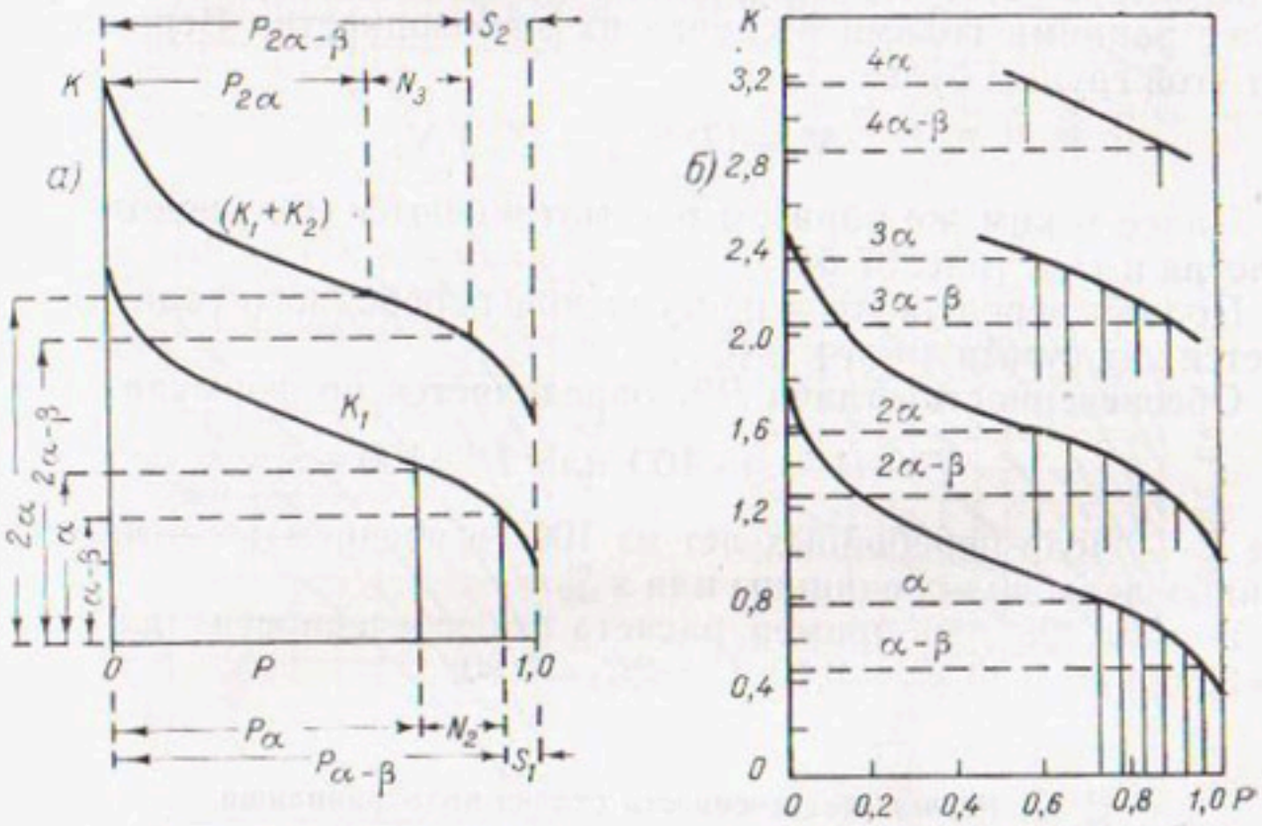


Рис. 37. Построение суммарных кривых обеспеченности стока.

а — выделение безусловно перебойных и бесперебойных лет; *б* — пример практического построения кривых.

ной кривой обеспеченности. Распределение же стока годов группы N_2 изображается частью этой кривой в интервале

$$\alpha > K > \alpha - \beta_м.$$

Упомянутая часть кривой должна быть выделена и построена так, чтобы обеспеченность стока $K=\alpha$ была принята за нуль, а обеспеченность стока $K=\alpha-\beta_м$ — за единицу. Суммирование исходной кривой обеспеченности с этой новой кривой производится путем разбивки последней на ряд интервалов и суммирования значений K, ограничивающих каждый из интервалов, с исходной кривой обеспеченности стока. По абсциссам полученных частных кривых определяются для каждой ординаты (K_1+K_2) абсциссы суммарной кривой обеспеченности 2-летий.

На этой кривой (рис. 37 *а*) можно выделить группу 2-летий

$$K_1+K_2 < 2\alpha - \beta_м,$$

которые относятся к перебойным. Обеспеченность их верхней границы ($K_1+K_2=2\alpha-\beta_м$) равна $P^{(2)}_{2\alpha-\beta}$. При этом вероятность s_2 наступления года, дающего перебой совместно с одним предшествующим, составляет

$$s_2=(1-P^{(2)}_{2\alpha-\beta})\,N_2.$$

Затем на кривой обеспеченности 2-летий выделяем зону

$$2\alpha > K_1+K_2 > 2\alpha-\beta_м,$$

годы которой могут дать перебой совместно с предшествующими более ранними годами в случае их маловодности. Вероятность N_3 лет этой группы будет

$$N_3=(P^{(2)}_{2\alpha-\beta}-P^{(2)}_{2\alpha})\,N_2.$$

Далее таким же образом рассматриваются полученные 3-летия, 4-летия и т. д. (рис. 37 *б*).

Полная вероятность s наступления перебойного года подсчитывается как сумма $s=s_1+s_2+\ldots$

Обеспеченность отдачи $P\%$ определяется по формуле

$$P=(1-s)\cdot 100 \text{ или } P=100-s,$$

где P — число перебойных лет из 100 (в среднем); s — число перебойных лет в долях единицы или в %.

В табл. 25 дан пример расчета обеспеченности для случая $\alpha=0{,}80$, $\beta_м=0{,}80$, $C_v=0{,}40$, $C_s=2C_v=0{,}80$.

Таблица 25

Расчет обеспеченности отдачи водохранилища

n-летия	Годы обеспеченные		Годы сомнительные		Годы необеспеченные	
	обеспеченность, %					
	относительная	абсолютная	относительная	абсолютная	относительная	абсолютная
1	65,35	65,35	34,65	34,65	0,0	0,0
2	45,93	15,90	52,90	18,32	1,17	0,41
3	37,73	6,90	57,79	10,60	4,48	0,82
4	35,16	3,72	58,52	6,20	6,32	0,67
5	34,8	2,16	58,80	3,65	6,40	0,40
—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	0,03	—	—
15	34,70	0,01	58,85	0,02	6,45	0,002
16	34,67	0,006	58,87	0,01	6,46	0,00
Итого		97,11			$\sum s_n=2{,}89$	

Отметим, что относительные обеспеченности для каждого *n*-летия дают 100%. Например, 37,73+57,79+4,48=100%. Абсолютные

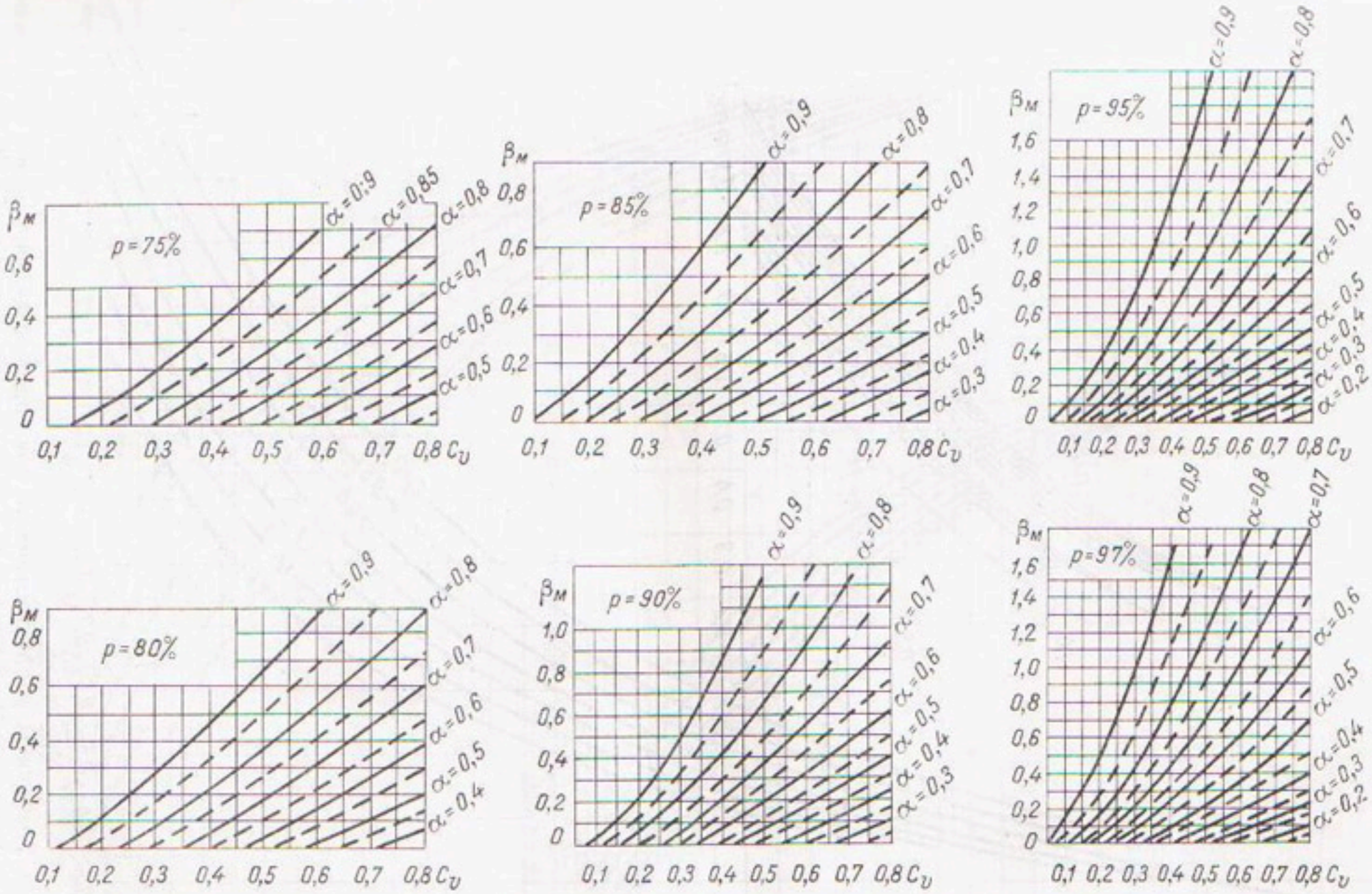


Рис. 38. Графики Я. Ф. Плешкова для определения многолетней составляющей емкости водохранилища при $C_s = 2C_v$, $r = 0$.

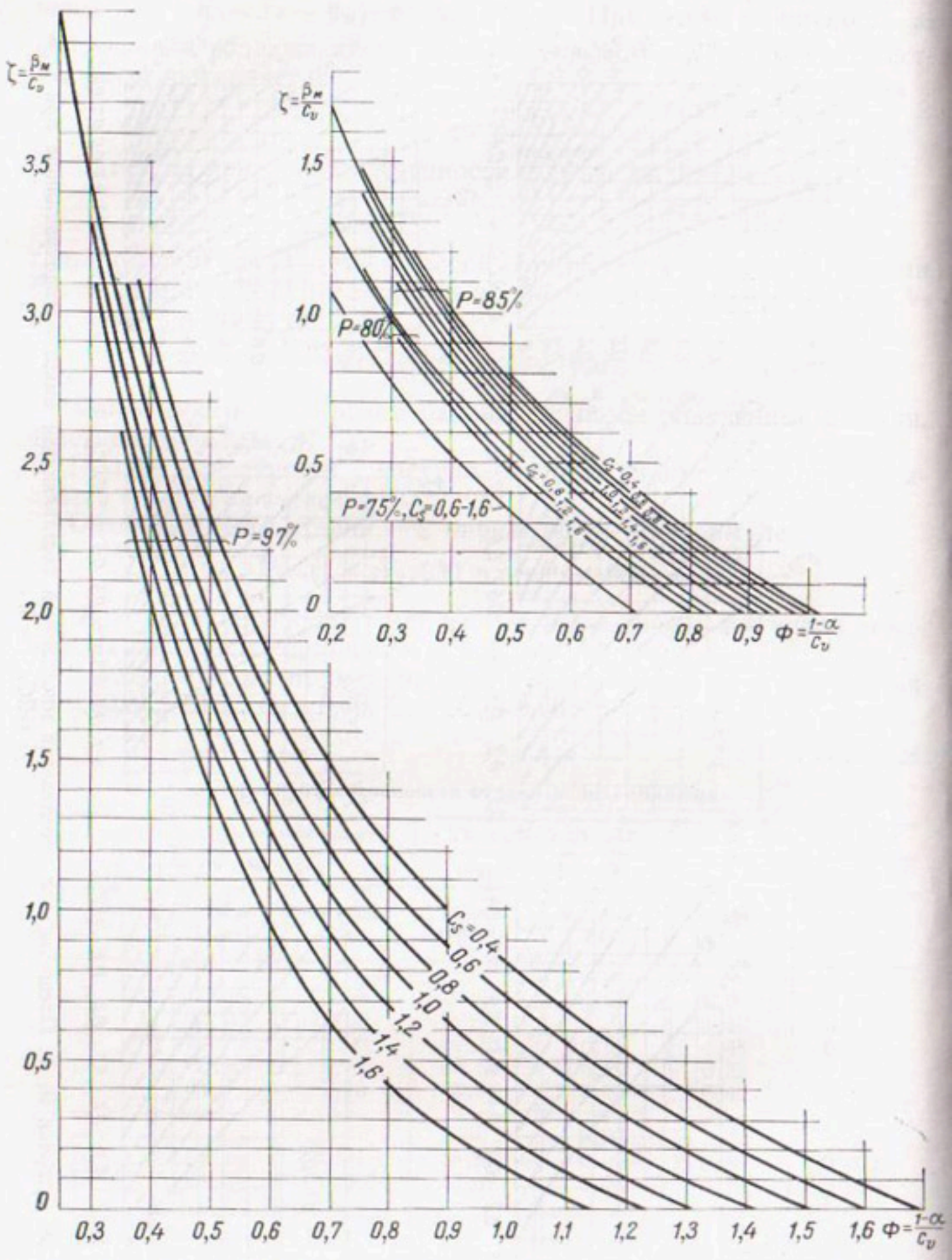


Рис. 39. Графики Н. М. Милославского для определения многолетней составляющей емкости водохранилища при $C_s \leqslant 2C_v$, $r=0$ и P, равных 75, 80, 85, 97%.

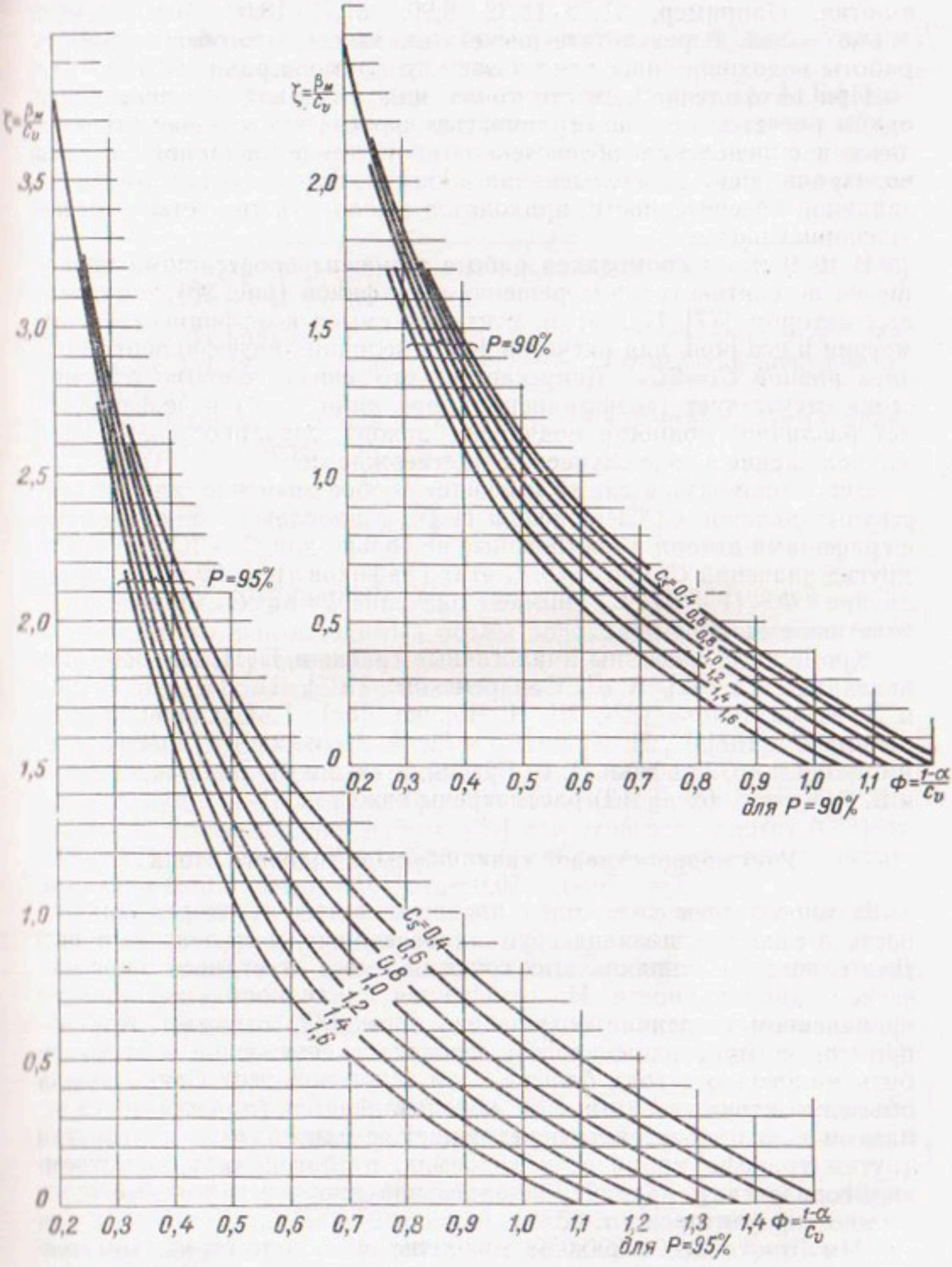


Рис. 40. Графики Н. М. Милославского для определения многолетней составляющей емкости водохранилища при $C_s \leq 2C_v$, $r=0$ и P, равных 90 и 95%.

обеспеченности выделяются из доли предыдущего сомнительного n-летия. Например, $37{,}73 \cdot 18{,}32 = 6{,}90$; $57{,}79 \cdot 18{,}32 = 10{,}6$; $4{,}48 \times \times 18{,}32 = 0{,}82$. В результате расчета оказалось, что обеспеченность работы водохранилища для указанного примера равна 97,11%.

При нахождении емкости точно для заданной обеспеченности одним расчетом обычно ограничиться нельзя, так как расчеты сводятся к определению обеспеченности отдачи по заданной емкости водохранилища. Для отыскания емкости, точно соответствующей заданной обеспеченности, приходится выполнять три-четыре вышеуказанных расчета.

В 1939 г. эта громоздкая работа заменена простейшими операциями по снятию готовых решений с графиков (рис. 38), построенных автором [77]. При этом, учитывая смысл коэффициента асимметрии и его роль для расчетов [105], величина коэффициента принята равной $C_s = 2C_v$. Допускается, что связь годовых объемов стока отсутствует (коэффициент корреляции $r = 0$) и чередование лет различной водности подчинено закону случайностей. Однако это положение в ряде случаев не подтверждается.

Здесь приводятся также имеющие особое значение для юго-восточных районов СССР графики Н. М. Милославского, связанные с графиками автора и построенные не только для $C_s = 2C_v$, но и для других значений C_s при $r = 0$. С этих графиков (рис. 39 и 40) по величине $\Phi = (1 - \alpha) : C_v$ снимаем значение $\zeta = \beta_м : C_v$, причем многолетняя емкость $\beta_м = \zeta C_v$.

Кроме того, известны аналогичные графики Г. П. Иванова при различных C_s [42], А. Д. Саваренского [107], И. П. Дружинина и Д. Маматканова [32], Ш. Ч. Чокина [38], Г. Г. Сванидзе при разных C_s [108], С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [61] при $C_v = 0{,}3$ и $C_s = 0{,}6$ и др. Графики И. В. Гуглий, а также Я. Д. Гильденблата и В. Р. Казака (см. § 13) рассмотрены ниже.

Учет корреляционной связи объемов годового стока

В многолетнем ходе стока прослеживается некоторая цикличность в виде чередования групп многоводных и маловодных лет. Длительность и водность этих групп не имеет отчетливой периодической закономерности. Но отмеченная цикличность, являющаяся проявлением тенденции сохранения аномалий, означает, что, например, за маловодным годом вероятность появления какого-нибудь маловодного года больше, чем многоводного. Связь между объемами стока смежных лет обусловливается, по-видимому, запасами влаги в бассейне, переходящей с одного года на другой (путем трансформации ее в водоемах, русловой сети, в подземных горизонтах), наличием аналогичной инерции в ходе метеорологических факторов и т. п.

Чем отчетливее выражена цикличность в ходе стока, тем теснее связь между величинами стока смежных лет, оцениваемая коэффициентом корреляции r, изменяющимся в пределах $0 \leqslant r \leqslant \leqslant \pm 1{,}0$. С повышением тесноты связи абсолютное значение r уве-

личивается, и, когда $r=\pm 1$, связь из корреляционной переходит в функциональную.

Обнаруживаются также, но более слабые, связи между объемами стока через один год, через два и т. д.

Уточняя расчеты водохранилищ по методу 1930 г., П. А. Ефимович показал, что при наличии корреляционной связи годовых объемов стока и сопутствующей ей цикличности коэффициент вариации стока за n-летия надо определять не по формуле (33), а по зависимости

$$C_v^{(n)}=\frac{C_v}{\sqrt{n}}\sqrt{1+\frac{2}{n}[r_1(n-1)+r_2(n-2)+r_3(n-3)\ldots]}, \quad (36)$$

где r_1 — коэффициент корреляции объемов стока смежных лет; r_2 — то же для объемов через один год; r_3 — то же для объемов через два года.

Ввиду малости величин r_2 и r_3 ими пренебрегают. Тогда уравнение (36) имеет более простой вид

$$C_v^{(n)}=\frac{C_v}{\sqrt{n}}\sqrt{1+\frac{2}{n}r_1(n-1)}. \quad (37)$$

Поскольку коэффициент C_v^n при учете корреляционной связи возрастает, то и необходимый объем водохранилища должен быть больше, чем без учета связи.

Разница в объемах при высоких α, C_v и $P\%$ может достигать 30—50% и больше.

По данным Ефимовича (1934 г.), для рек Европейской территории СССР и зарубежных (всего 25 рек, из них 10 с периодами наблюдений 10—16 лет) коэффициент r_1 изменяется от —0,4 для Эльбы (в более поздней работе [59] для этой реки дается 0,23) до 0,48—0,58 для Свири, Выга, Сандалки. Средние значения r составляют: $r_1=0{,}33\pm0{,}04$; $r_2=0{,}15$; $r_3=0{,}07$ и далее $r=0$.

Если, по Д. Л. Соколовскому [112], исключить из учтенных Ефимовичем 7 рек, зарегулированных озерами или карстом, получим $r_1=0{,}22\pm0{,}19$, т. е. величина r лишь незначительно превышает свою среднюю ошибку.

Г. П. Иванов [42] для 18 рек с общей длительностью наблюдений 1000 лет получил значения r_1 в пределах от 0,08 до 0,41, в среднем $r_1=0{,}19$.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61] по 37 рекам с числом лет наблюдений 2141 определили, что r_1 изменяется в пределах от 0 до 0,45, в среднем $r_1=0{,}24$.

В работе [108] приводятся данные ГГИ по 72 пунктам на 40 реках СССР (с рядами наблюдений $n\geqslant 50$ лет), по которым величины r_1 изменяются в пределах от $-0{,}023\pm0{,}133$ (р. Дон) до $0{,}690\pm0{,}072$ (р. Ангара), причем средние значения составляют: $r_1=0{,}30$, $\sigma_1=0{,}11$; $r_2=0{,}08$, $\sigma_2=0{,}12$; $r_3=0{,}0$, $\sigma_3=0{,}12$.

Величины C_v, C_s и r от r_1 до r_7 приведены также в работе [96].

Из приведенного видно, что коэффициент корреляции r_1 обычно невелик и нередко бывает меньше средней своей ошибки, что для многих случаев позволяет считать его как величину неустойчивую даже для значительного пространства. Он существенно колеблется даже при небольшом изменении гидрометрического ряда, но имеет тенденцию к повышению с увеличением водосбора. По имеющимся данным для водотоков с площадью водосборов примерно до 50 тыс. км^2, годовые объемы стока при расчете водохранилищ могут рассматриваться как независимые.

Отметим при этом, что величина коэффициента r_1, изменяющегося по приведенным данным в пределах от величины, несколько

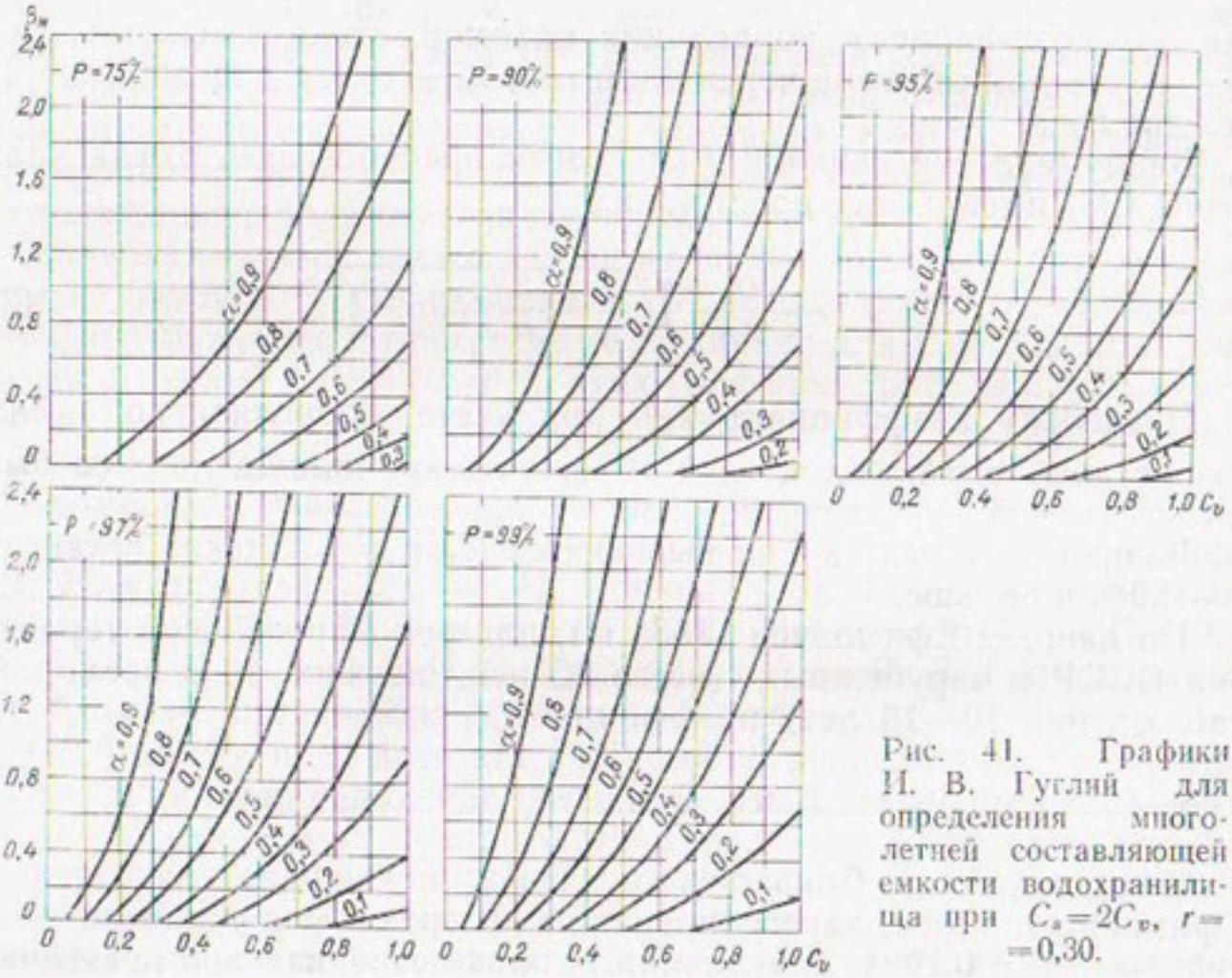


Рис. 41. Графики И. В. Гуглий для определения многолетней составляющей емкости водохранилища при $C_s = 2C_v$, $r = 0{,}30$.

меньше нуля, до 0,40—0,50, а иногда и более (преимущественно до 0,25—0,30), должна определяться обобщенно для всего региона по нескольким пунктам с большим числом лет наблюдений. И для тех бассейнов, где обнаруживается достаточно тесная связь стока смежных лет, ею безусловно пренебрегать нельзя. В таких случаях допускаемое в методах 1935—1941 гг. положение о независимом появлении каждого из годовых объемов стока является недостаточно осторожным, что при известных условиях может привести к занижению объема водохранилища. Последнее обстоятельство обнаруживается при расчетах водохранилищ в засушливых районах с большими коэффициентами изменчивости годового стока C_v и при высоких α и $P\%$.

Учитывая изложенное, С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [57] вывели формулы для суммарных кривых обеспеченности стока, заменяющие графическое суммирование (метод 1935—1940 гг.) и учитывающие при помощи коэффициента корреляции r связь между годовыми объемами стока смежных лет при $C_s=2C_v$.

По упомянутым формулам И. В. Гуглий построил графики при $r=0{,}30$ (рис. 41). Графики Я. Ф. Плешкова, как указывалось выше, соответствуют случаю $r=0$. Одна из этих двух систем графиков, соответствующая $r=0$, применяется при умеренных коэффициентах изменчивости стока и при коэффициентах регулирования, не очень близких к единице. Вторая система ($r=0{,}30$) используется для засушливых районов при значительных C_v, α и $P\%$. Для промежуточных значений r объемы $\beta_м$ находятся по интерполяции между емкостями по графикам Плешкова и Гуглий. Эти графики теперь дополнены комплектом номограмм Г. Г. Сванидзе [108], построенных (с использованием ЭЦВМ) на основе моделирования рядов стока при различных C_s и r.

Метод А. Д. Саваренского

Новый шаг в теории обобщенных расчетов регулирования стока представляет метод А. Д. Саваренского [106], называемый методом кривых обеспеченности наполнений. Этот метод позволяет определить не только обеспеченность гарантированной отдачи водохранилища, но и другие элементы регулирования: обеспеченности сбросов, перебоев, наполнений и связанных с ними производных (затоплений, напоров и т. п.).

Метод А. Д. Саваренского позволяет также выявить элементы неустановившихся, переходных режимов регулирования, сопутствующих изменению водопотребления, введению в работу выше расположенных установок, периоду первоначального наполнения водохранилища и т. п. Этот период особенно важен для установок с большими полезными и мертвыми объемами (по отношению к стоку Γ_0) — таких, как Бухтарминская на Иртыше, Братская на Ангаре, Мингечаурская на Куре и др. Полученная в результате расчетов кривая обеспеченности наполнений к концу первого, второго и других лет пускового периода является ориентиром для правильного назначения сроков строительных работ, затопления земель, ввода в эксплуатацию отдельных агрегатов и сооружений.

Принимая, что в конце любого интервала времени наполнение водохранилища равно начальному плюс приток минус отдача за интервал, Саваренский анализирует наполнения в конце (или, что то же, в начале) таких повторяющихся интервалов. При этом, если приток задан в виде кривой обеспеченности, то и конечные наполнения водохранилища получаются также в виде соответствующей кривой обеспеченности. В форме такой кривой могут быть заданы и сами исходные наполнения. Принимая условную кривую начальных наполнений, можно последовательными повторными построениями от одного интервала (года или сезона) к другому получить

искомую безусловную кривую обеспеченности наполнений $V=f(P)$ для моментов смены интервалов.

При этом произвольность исходной кривой влияет на очертания последующих ее вариантов лишь в течение 2—3 ближайших интервалов. Затем это влияние затухает, и признаком законченности расчета служит стабилизация формы кривой $V=f(P)$.

В качестве упомянутых расчетных интервалов времени могут быть: а) год в целом без учета внутригодовых колебаний стока, б) сезоны года (см. § 13). В первом случае кривая $V=f(P)$ будет представлять среднее распределение вероятностей наполнений многолетней составляющей емкости, т. е. предполоводных наполнений водохранилища при очень длительной его работе по заданному режиму.

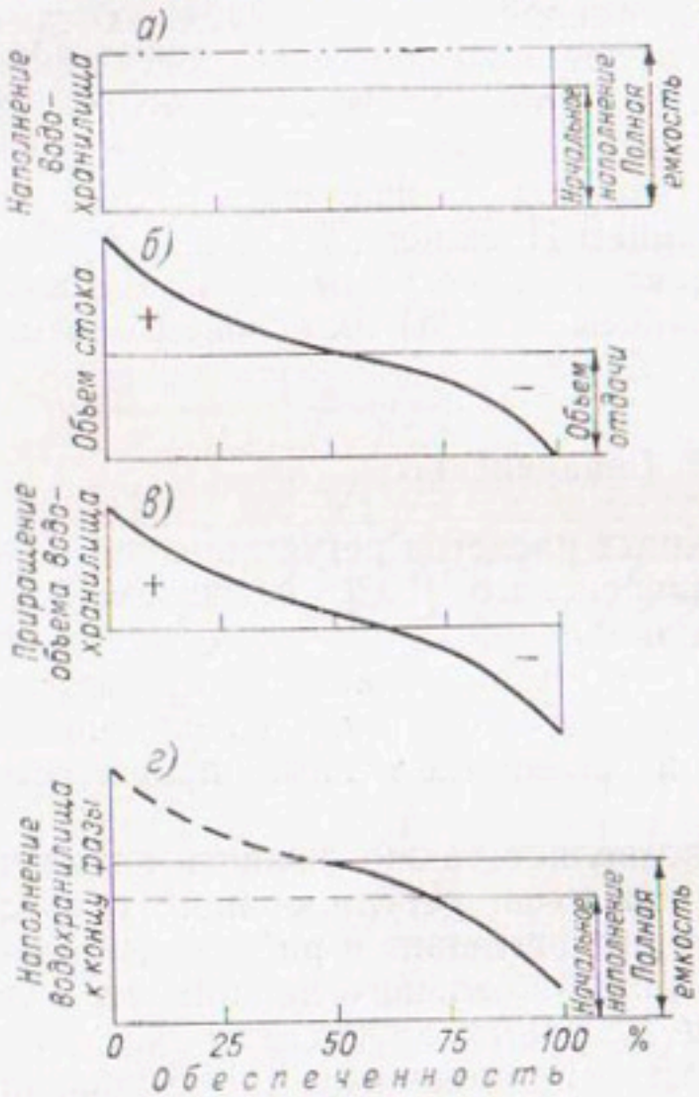


Рис. 42. Построение кривой обеспеченности наполнений водохранилища при заданном начальном его наполнении.

Как и по методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1935 г.), расчет здесь заключается в построении кривых обеспеченности сумм по исходным кривым обеспеченности слагаемых. Для годовых интервалов расчет выполняется в следующем порядке:

1) на момент, принимаемый за начало расчета (например, конец межени), для заданного объема водохранилища $V_м$ назначается некоторое его начальное наполнение в виде определенного значения или в форме произвольной кривой $V=f(P)$, начальный вид которой при отыскании стабильного ее вида может быть произвольным;

2) при известных Γ_0, C_v и C_s строится кривая обеспеченности стока за год, следующий за начальным моментом расчета;

3) по заданным: а) начальному наполнению, б) кривой обеспеченности стока и в) годовой отдаче — брутто строится кривая $V=f(P)$ к концу года;

4) кривая, построенная по п. 3, принимается за исходную при построении кривой $V=f(P)$ для конца следующего года;

5) расчет вариантов кривых продолжается до тех пор, пока не будет получена стабильная кривая $V=f(P)$.

В построениях по сезонам года — фазам стока (половодье, межень) расчеты выполняются в том же порядке. Но при этом кри-

вые обеспеченности наполнений строятся не для многолетней составляющей $V_м$, как в расчетах по годовому стоку, а для всей полезной емкости $V_п$. Разбор этого построения дан в § 13.

На рис. 42 приводятся построения с конкретной начальной емкостью (в м³), составляющей часть полной (рис. 42 *а*). На рис. 42 *б* дана кривая обеспеченности стока за год (или фазу). Здесь же нанесена линия постоянной отдачи за год (фазу). На рис. 42 *в* дан график приращения емкости водохранилища за год (фазу) при различных величинах стока за год (фазу). Рисунок 42 *г* представляет искомую кривую обеспеченности наполнений водохранилища к концу года (фазы).

На рис. 43 изображены аналогичные построения для случая, когда начальные наполнения заданы в виде кривой обеспеченности. При этом построения выполняются путем замены начальной кривой ступенчатым графиком (рис. 43 *а*) с переходом от общей кривой распределения (т. е. обеспеченности) наполнений к частным кривым или заменяющим их ступеням. Понятно, что наибольшая по высоте ступень не должна превышать $V_м$, если колебания стока внутри года не учитываются; наименьшая ступень может иметь нулевое наполнение (участок на оси x от конца кривой до $P=100\%$).

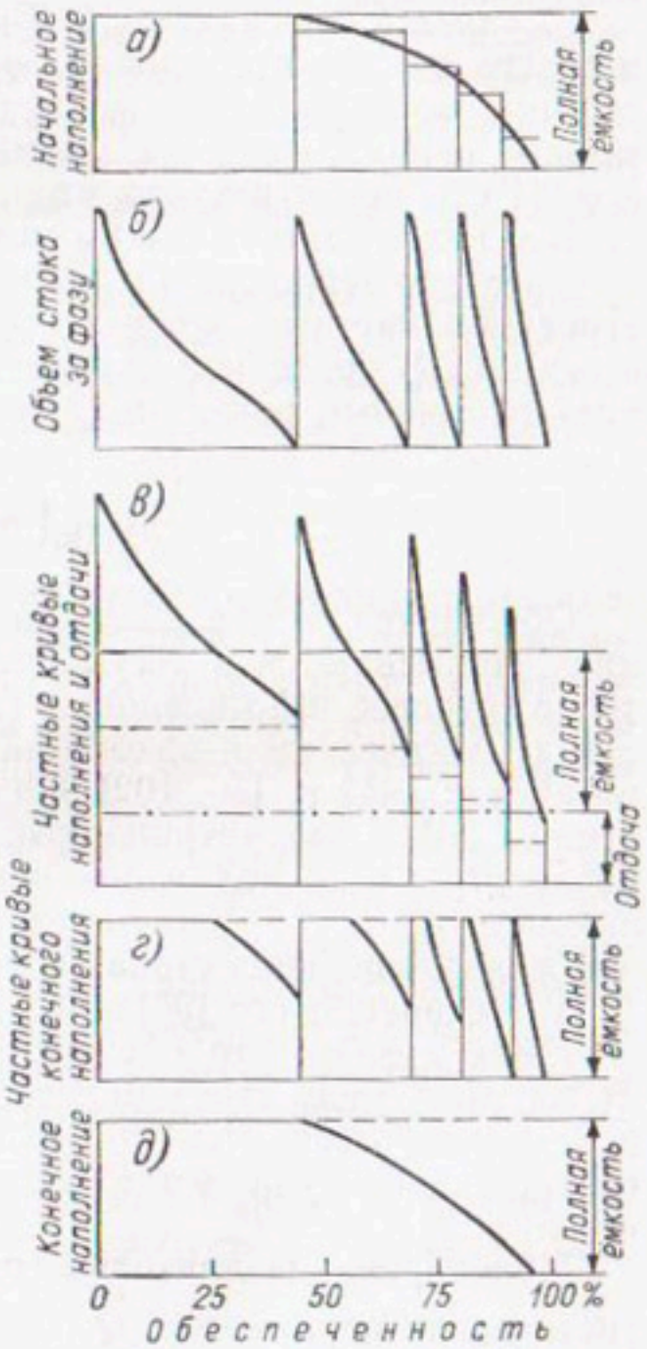


Рис. 43. Построение кривой обеспеченности наполнений водохранилища (м³) при начальных наполнениях, заданных кривой обеспеченности.

Кривые обеспеченности стока за год (фазу) приурочены к каждой ступени, причем абсциссы каждой кривой умножаются на вес ступени Δt (рис. 43 *б*) в долях единицы ($\sum \Delta t = 1{,}0$). Эти кривые строятся над верхней полкой своей ступени. Затем в основании всего графика выделяется слой, по высоте равный отдаче брутто $A_{бр}$ за год (фазу), а над ним — слой, равный $V_м$ или $V_п$ (рис. 43 *в*). В пределах этого слоя содержатся частные кривые обеспеченности наполнений (рис. 43 *г*). Суммирование их производится путем сложения частных абсцисс для каждого из нескольких значений равновеликих ординат в пределах от $V=0$ до $V=V_м$ или до $V=V_п$.

В результате находим абсциссы общей кривой $V=f(P)$ в конце года или фазы (рис. 43 *д*).

Расчет неустановившегося во времени режима ведется в том же порядке, но начальный и конечный моменты его определяются условиями задачи. Так, при изменении водопотребления начальное наполнение принимается наличным на момент изменения, а искомой является новая кривая $V=f(P)$ на конец первого, второго и других лет или стабильная форма этой кривой. При исследовании режима водохранилища в период его наполнения в начальный момент оно принимается пустым, а искомыми являются кривые $V=f(P)$ на конец первого, второго и других лет периода.

Все изложенные расчеты можно выполнять в относительных величинах (по отношению к $\overline{Y}_0$) и в абсолютных объемах (в м^3) с построением частных кривых обеспеченности стока и наполнений и без них. В последнем случае промежуточные построения заменяются табличным расчетом (форма таблицы показана в § 13).

Метод Монте-Карло

Обобщения, основанные на массовых статистических испытаниях, применяются в регулировании стока с 1927 г. [154]. Достаточно строгое обоснование таких испытаний и применения их к гидрологическим и водохозяйственным расчетам впервые дается в работах 1946 г. [56, 102]. Но только в начале 60-х годов с появлением ЭВМ рассматриваемый прием расчета получил широкое распространение под названием метода Монте-Карло. Формированию этого метода в области моделирования гидрологических рядов и регулирования стока посвящены работы Г. Г. Сванидзе [108], А. Ш. Резниковского [96] и др.

Имея в виду, что обычный водохозяйственный расчет по календарному ряду стока является по смыслу вероятностным, и тем в большей мере, чем длительнее исходный ряд, производится искусственное удлинение исходного ряда до 1000, 2000 лет и более.

Моделирование длительного ряда выполняется так, чтобы статистические параметры ($\overline{Q}$, C_v, C_s, r) исходного и нового рядов были одинаковыми. В результате исходный ограниченный ряд стока сам оказывается лишь весьма несовершенным вариантом метода Монте-Карло [108].

Хотя репрезентативность обоих рядов одинакова (по их статистическим параметрам), моделирование рядов, например, в 1000 лет позволяет обнаружить большее число более разнообразных сочетаний стока, возможных для параметров исходного ряда [108].

Понятно, что ряд в 1000 лет не распространяется в буквальном смысле на будущее или прошлое время. Он используется лишь как весьма расширенная информация о стоке, имеющая те же фактические параметры стока и служащая для надежного выявления различных его сочетаний. При этом выводы по регулированию стока

будут более надежными, чем по исходному гидрометрическому ряду.

Моделирование ряда независимых годовых величин стока выполняется следующим образом.

По исходным параметрам строится кривая обеспеченности стока. Далее, пользуясь таблицей случайных чисел (Дж. Вильямса и др.), отбираем по определенной системе числа. Эти числа принимаем за обеспеченность в процентах, отделяя запятой первые две цифры, или в долях единицы, считая цифры таблицы за десятичную дробь после запятой. Для отобранного ряда цифр — случайных обеспеченностей — по упомянутой кривой находят соответствующие им величины стока.

Кривые обеспеченности — исходная и построенная по данным 1000-летнего ряда — почти полностью совпадают.

При наличии корреляционной связи между членами ряда существует несколько вариантов использования метода Монте-Карло, в том числе с применением уравнения регрессии для получения следующего члена ряда в зависимости от предыдущего [108].

На основе расчетов по методу Монте-Карло Г. Г. Сванидзе построил графики для определения многолетней составляющей емкости водохранилища при разных коэффициентах r и трех соотношениях $C_s : C_v$. Одновременно он дал указания к учету внутригодового распределения стока (прием фрагментов) для получения всей полезной емкости водохранилища. Сезонная составляющая емкости может быть определена и обычным путем (см. § 12).

В заключение отметим, что метод Монте-Карло находит применение также в исследованиях вероятностей маловодных n-летий [9], в проверке режима сложных водохозяйственных систем, каскадов ГЭС и т. п. Выгода этого метода при использовании ЭВМ состоит в том, что он удачно сочетает преимущества иллюстрации режима работы установок «по хронологическому ряду стока» с возможностями широкого вероятностного обобщения результатов.

В существующей разработке метод Монте-Карло еще полностью не исчерпан. В некоторых деталях он требует дальнейшего развития.

§ 12. УЧЕТ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ СТОКА И ЗАДАННОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Для учета сезонных колебаний стока и водопотребления при расчете водохранилищ применяются различные приемы. Первый из них основан на условном делении полезной емкости $V_п$ на составляющие $V_м$ и $V_с$. Второй прием учитывает совместно годовые и сезонные колебания стока. Оба эти приема, исходя из анализа вероятностей величин стока, дают вероятности водохозяйственных характеристик как результат расчета многолетнего и даже глубокого сезонного регулирования стока. Третий прием сводится к статистической обработке не величин стока, а элементов

водохозяйственного расчета по гидрометрическому ряду и используется в основном при неглубоком сезонном регулировании.

Роль емкости β_c, предназначенной для внутригодового перераспределения стока, неодинакова в водохранилищах сезонного и многолетнего регулирования, что должно учитываться расчетными схемами для ее определения. При сезонном (годовом) регулировании она является единственным источником покрытия дефицита притока в маловодные периоды. Поэтому сток межени M_P, режим которого при заданном режиме водопотребления определяет собой в этом случае полную емкость водохранилища, должен соответствовать расчетной обеспеченности.

Схема распределения стока за межень принимается по гидрометрическим данным и обычно за годы с неблагоприятным ходом стока, чтобы емкость водохранилища для других лет не оказалась заниженной.

Распределив по принятой схеме (по месяцам, декадам) величину M_P, можно построить интегральную кривую стока за расчетную межень и по ней определить отдачу по заданной емкости, или наоборот.

Для водоотдачи α, приближающейся к годовому стоку заданной обеспеченности $K_{P\text{г}}$[1], потребная сезонная емкость водохранилища определяется простейшей формулой

$$\beta_c = \alpha t - mK_{P\text{м}} \tag{38}$$

или

$$V_c = At - M_P, \tag{38'}$$

где β_c — сезонная емкость в долях среднегодового стока; t — длительность межени в долях года; m — доля среднего стока межени в среднегодовом стоке; $K_{P\text{м}}$ — сток межени расчетной обеспеченности в долях от среднего стока межени.

Эта формула удовлетворяет, в частности, и случаю перехода от сезонного к многолетнему регулированию (при $\alpha = K_{P\text{г}}$).

Определение сезонной составляющей емкости при многолетнем регулировании удобно начать с рассмотрения схемы работы водохранилища, имеющего наполнение $V_\text{м}$ в начале периода и опорожненного в конце (рис. 44). Схема изображает разностную интегральную кривую стока реки в маловодный период.

Год делится на два сезона. В один из них расходы больше отдачи, соответствующей горизонтальной линии, во второй — меньше. Ломаная *1—3—5—7—9* представляет наполнения водохранилища при равномерном в каждом году притоке, а линия *1—2—3—4—5—6—7—8—9* — наполнения при схематизированной внутригодовой неравномерности притока. Участок *3—9* изображает критический период сработки емкости $V_\text{м}$. Предшествующий этому периоду год (линия *1—2—3*) имеет сток, равный зарегулированной отдаче. Поэтому точки *1* и *3* начала и конца года располагаются на горизон-

[1] В этом случае период дефицита стока, изменяющийся от нуля при отдаче, равной бытовым минимальным расходам, до некоторого конечного значения, становится стабильным и равным продолжительности межени.

тали, а меженный сток этого года (линия *2—3*) определяет собой необходимую сезонную составляющую емкости V_c.

Сток года *1—3* не может быть менее годовой отдачи, так как в противном случае он увеличил бы маловодное многолетие и емкость $V_м$. Принимая сток этого года больше отдачи, мы рисковали бы преуменьшить сезонную составляющую V_c. Аналогичные соображения будут и в случае, если в критический период водохранилище вступает заполненным, а год со стоком, равным отдаче, располагается вслед за этим периодом.

Если в треугольнике *1—2—3*, оставляя без изменения годовую отдачу *1—3*, увеличить ее в половодье и уменьшить в межень, емкость V_c уменьшится, а при обратных изменениях отдачи по сезонам — увеличится. Однако такого увеличения в предшествующем году не потребуется, так как в запасе имеется многолетняя составляющая; при расположении же дополнительного года в качестве последующего сезонная составляющая с повышением отдачи в межень соответственно повысится. Это необходимо иметь в виду, если отдача отклоняется от равномерной в течение года.

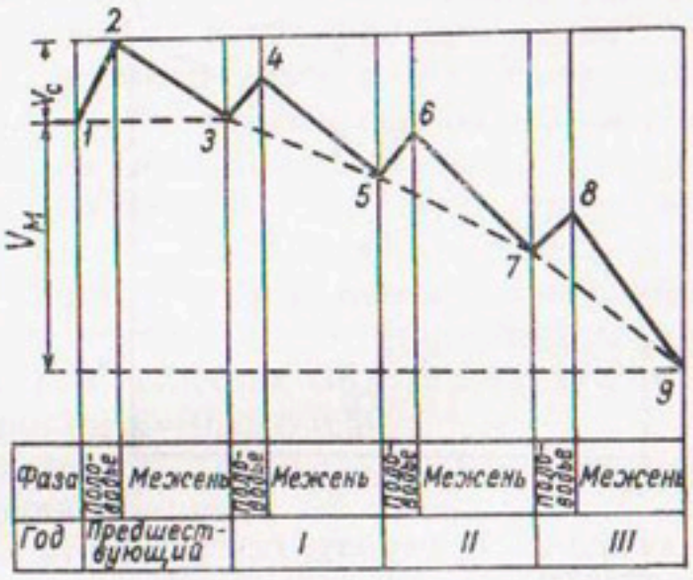


Рис. 44. Необходимость сезонной составляющей емкости водохранилища при многолетнем регулировании стока.

В случае многолетнего регулирования стока сезонная составляющая емкости лишь условно отделяется от многолетней и потребные размеры ее определяются во взаимосвязи со всеми параметрами водохранилища как единого целого (V_0, $V_м$, V_c, α). При этом сохранение той же маловодности расчетной межени, как в случае годового регулирования, привело бы к преувеличению полной емкости водохранилища, так как вероятность совпадения маловодного многолетия с маловодной последующей (или предыдущей) меженью уменьшается по сравнению с вероятностью каждого из указанных элементов, рассматриваемых в отдельности.

Например, в случае весьма значительных размеров многолетней составляющей емкости, по С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю [61], можно принять, что сезонная составляющая должна определяться в расчете на среднюю по водности межень M_0. Относя это положение к случаю полного регулирования стока, получаем для $\alpha=1$ следующее значение сезонной составляющей емкости:

$$\beta_c = t - m. \qquad (39)$$

Уравнения (38) и (39) удовлетворяют двум крайним значениям сезонной составляющей, отвечающей полному регулированию

при $\alpha = 1{,}0$ и сезонному или годовому регулированию при $\alpha \leqslant \leqslant K_{Pr}$.

Меженный сток, учитываемый при определении сезонной составляющей емкости, изменяется при этом в пределах от M_P — при полном годовом регулировании до M_0 — при полном многолетнем регулировании.

В интервале между значениями α от 1,0 до K_{Pr} сезонная составляющая может быть установлена по стоку межени, определяемому интерполяцией между указанными двумя пределами.

Если годовые объемы стока отложить параллельно основаниям трапеции, а вдоль ее высоты расположить модульные коэффициенты в пределах от K_{Pr} до 1,0, получим следующее соотношение для интерполяции при $m \neq \text{const}$ (рис. 45):

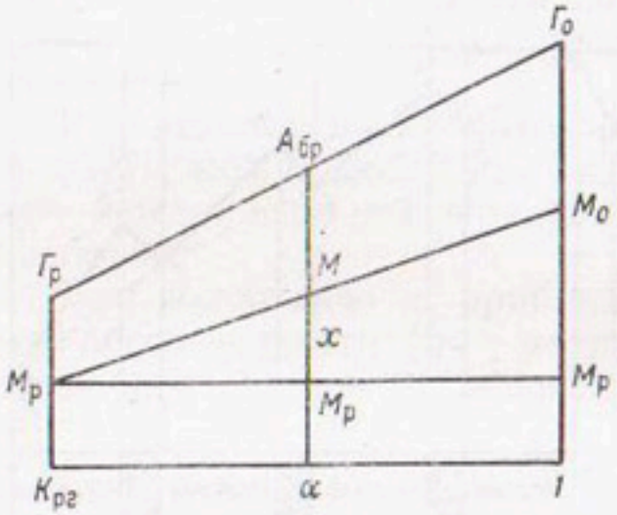


Рис. 45. К расчету сезонной составляющей емкости водохранилища при $C_{vr} \neq C_{vм}$ (т. е. $m \neq \text{const}$).

$$\frac{\alpha - K_{Pr}}{x} = \frac{1 - K_{Pr}}{M_0 - M_P}, \qquad (40)$$

откуда

$$x = (M_0 - M_P)\frac{\alpha - K_{Pr}}{1 - K_{Pr}}. \qquad (41)$$

Значит, расчетный приток за межень при отдаче α равен

$$M = M_P + x = M_P + \\ + (M_0 - M_P)\frac{A - \Gamma_P}{\Gamma_0 - \Gamma_P}. \qquad (42)$$

Поскольку емкость V_c равна разности между отдачей и притоком за межень, то

$$V_c = At - M_P - (M_0 - M_P)\frac{A - \Gamma_P}{\Gamma_0 - \Gamma_P}, \qquad (43)$$

т. е.

$$V_c = At - M_0 + (M_0 - M_P)\frac{\Gamma_0 - A}{\Gamma_0 - \Gamma_P} \qquad (44)$$

или

$$\beta_c = \alpha t - m + m\frac{1 - K_{PM}}{1 - K_{Pr}}(1 - \alpha). \qquad (45)$$

Зависимость (45), установленная С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем [61], при $\alpha = K_{Pr}$ и $\alpha = 1{,}0$ приводится соответственно к виду формул (38) и (39).

При сравнительно небольшой разнице между коэффициентами вариации годового и меженного стока C_{vr} и $C_{vм}$ могут быть использованы формулы:

при $\alpha \leqslant K_{Pr}$ (емкость сезонного регулирования)

$$\beta_c = \alpha t - mK_{Pr}, \tag{46}$$

при $\alpha \geqslant K_{Pr}$ (сезонная составляющая емкости многолетнего регулирования)

$$\beta_c = \alpha (t - m). \tag{47}$$

Формулы (46) и (47) являются частным выражением общего уравнения (45) и вытекают из него при $C_{vr} = C_{vm}$.

Разница в изменчивости годового и меженного стока вполне возможна и наблюдается по фактическим стоковым рядам. Но, как показывают исследования, влияние ее в водохозяйственных расчетах при обычно применяемых параметрах регулирования стока невелико. Это легко проследить по рассмотренным в § 13 графикам Я. Д. Гильденблата и В. Р. Казака, составленным при равных и неравных коэффициентах C_{vr} и C_{vm} для всей полезной емкости водохранилища $\beta_п = f(\alpha, C_{vr})$ при $P = 95$ и 97%. На этих графиках видно, что при разнице между C_{vm} и C_{vr} до 50% ($C_{vr} = 0{,}60$, $C_{vm} = 0{,}40$ или $C_{vm} = 0{,}60$, $C_{vr} = 0{,}40$) и при $P = 97\%$ максимальные поправки к рабочей емкости водохранилища, рассчитанной при $C_{vr} = C_{vm}$, не превышают по абсолютной величине $\Delta\beta = \pm 0{,}09$ и относятся к коэффициентам регулирования $\alpha = 0{,}25 \div 0{,}40$.

С отклонением зарегулированности от указанных пределов в сторону увеличения и уменьшения поправки $\Delta\beta$ уменьшаются до нуля, и для наиболее часто применяемого в условиях юга СССР коэффициента регулирования стока $\alpha = 0{,}65 \div 0{,}75$ (при $P = 97\%$) поправка $\Delta\beta$ даже при соотношении $C_{vm} : C_{vr} = 1{,}5$ составляет всего лишь 4—6% всей полезной емкости водохранилища.

Наряду с количественной оценкой результатов и условий определения сезонной емкости следует иметь в виду также необходимые данные для расчета β_c по формулам (38) и (45)—(47).

При расчете сезонной емкости по указанным уравнениям требуются дополнительные параметры стока: при использовании формул (38) и (45) — три параметра (t, m и C_{vm}), при использовании формул (46) и (47) — два параметра (t и m).

Для определения величин m и t необходимо проанализировать типичное распределение стока по сезонам для многоводных, средних и маловодных лет (в том числе и для года с притоком $K = \alpha$). Это необходимо для того, чтобы проследить, как изменяется (и насколько систематически) значение m в зависимости от водности года.

Доля меженного стока в маловодные годы бывает выше средней ($m_{мал} > m_{ср}$), что обычно свойственно южным рекам, для которых водность года определяется весенним половодьем. Обратное соотношение относится к северным рекам со значительным дождевым стоком за лето [6].

Часто m принимается для расчета осредненной по 3—4 маловодным годам или по году со стоком $K = \alpha$. Однако величину m

целесообразнее принимать (из осторожности) как среднее за многолетие. Такое решение приемлемо и для случаев, когда относительный сток межени m маловодных лет бывает больше средней величины m, но при этом наблюдаются и маловодные годы с низким значением m. (Последнее обстоятельство означает, что зависимость между годовым стоком и долей межени m не является достаточно тесной.)

В заключение отметим, что при сравнительно высоких α (например, $\alpha=0{,}50$ и выше) влияние ошибки в определении m на точность установления объема водохранилища и его отдачи (при изложенном выше способе расчета V_c) снижается, и тем в большей мере, чем больше α, так как при этом уменьшается доля V_c в общей емкости [78]. Лишь при небольших α, когда регулирование оказывается почти или целиком сезонным, ошибка в меженном притоке может дать более ощутимые погрешности. Поэтому расчет величины V_c по осредненному значению m пригоден только для глубокого многолетнего регулирования. При сезонном (годовом) и неглубоком многолетнем регулировании, когда емкость V_c соизмерима с $V_м$, необходимо использовать более детальное внутригодовое распределение стока, с учетом его зависимости от водности года [6].

В статье [39] предложен обобщенный прием расчета внутригодового распределения стока применительно к сезонному регулированию по методу балансовых разностей. Этот прием пока весьма трудоемкий, и для многолетнего регулирования еще не подготовлен.

При использовании формул (38), (39), (45)—(47) следует учитывать условия их применимости. При низких α формулы (38) и (46) должны корректироваться в соответствии с характером распределения стока на протяжении межени. Поскольку формулы (38)—(47) используются при равномерном водопотреблении в течение года, то для неравномерного потребления воды они должны быть соответственно видоизменены.

Так, например, при одинаковом за год потреблении воды из водохранилища в одном случае на орошение, а во втором — на равномерное водоснабжение, в первом случае, очевидно, потребуется бóльшая сезонная емкость, чем во втором. Это легко обнаруживается при сопоставлении интегральных кривых притока в водохранилище и водопотребления, соотношением которых и определяется величина сезонной емкости (рис. 46 *а*).

При использовании всей годовой отдачи A в течение некоторой части года (например, на орошение) зависимость (44) преобразуется так:

$$V_c = A - bM,$$

где M — приток за всю межень, определяемый по формуле (42); b — часть этого притока в долях единицы, учитываемая за время от начала межени (конец половодья) до момента наибольшей

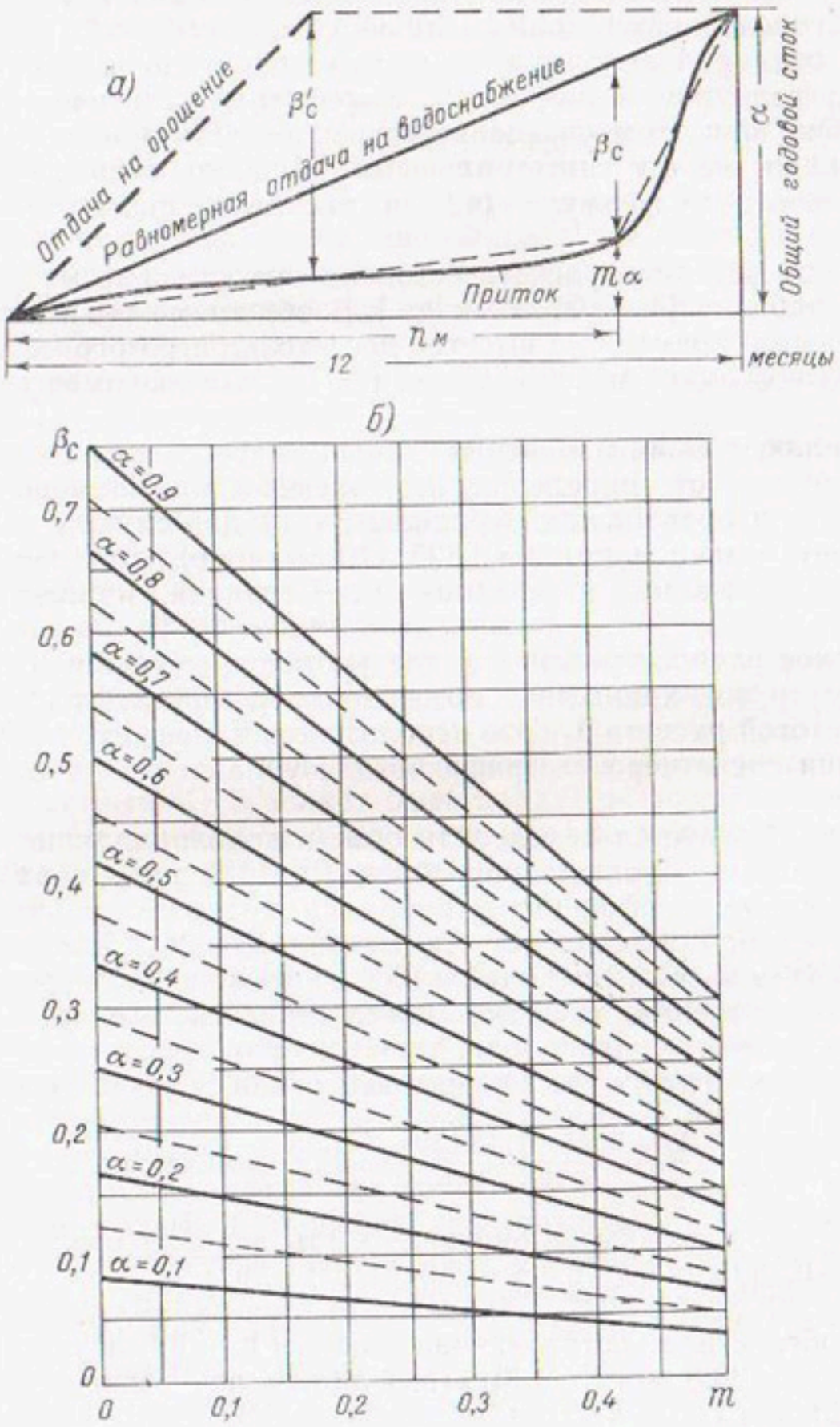


Рис. 46. Определение сезонной емкости водохранилища при полном годовом и многолетнем регулировании.

а — влияние графика водопотребления на величину сезонной емкости, *б* — график к определению сезонной емкости $V_c=(0{,}833-m)\,\alpha\Gamma_0=\beta_c\Gamma_0$ при отдаче $Q_{бр}=\text{const}$ в течение года.

разницы между интегральными величинами отдачи и меженного притока (рис. 46 *а*). Значение *b* принимается по данным о внутригодовом распределении годовых величин стока $Г \approx A \approx \alpha Г_0$.

Если отдача A используется неравномерно, но в течение всего года, то величину емкости V_c выразить аналитически невозможно. Она при этом определяется непосредственно как наибольшая разница между интегральными кривыми отдачи и притока M, найденного по формуле (42) и распределенного по месяцам межени.

Вопросы методики расчета сезонной емкости рассматриваются также в работах [4, 7, 37, 70 и др.]. В общем можно считать, что до настоящего времени не имеется достаточно строгого метода расчета сезонной емкости, пригодного для разных режимов водопользования.

Для иллюстрации изменения сезонной составляющей емкости в зависимости от определяющих элементов построен график (рис. 46 *б*), изображающий уравнение (47) для случая равномерной в году отдачи и при $t=0{,}833$ (10 месяцев), что свойственно большинству малых и средних рек средней полосы и юга СССР.

Широкое распространение раздельного определения составляющих емкости водохранилища объясняется наличием графиков для $\beta_м$ и простотой расчета β_c. Это используется далее (см. гл. VII) при построении диспетчерских графиков для управления работой водохранилищ.

Пример. Требуется определить объем водохранилища при следующих данных: площадь водосбора $F=1113$ км²; норма стока $q_0=1{,}3$ л/с·км²; коэффициент вариации годового и меженного стока $C_v=0{,}55$; коэффициент асимметрии $C_s=2C_v$. Распределение стока: 75% за весну (2 месяца) и 25% за межень (10 месяцев). Отдача водохранилища $\alpha=0{,}65$, обеспеченность его работы $P=97\%$.

Порядок расчета. Определяем среднегодовой сток

$$Г_0=\frac{1{,}3\cdot 31{,}55\cdot 1113\cdot 10^6}{10^3}=45{,}6 \text{ млн. м}^3/\text{год}.$$

По рис. 46 находим сезонную емкость в долях среднегодового стока $\beta_c=0{,}380$ или $V_c=0{,}380\cdot 45{,}6=17{,}33$ млн. м³.

По рис. 38 для $P=97\%$ находим, что при данных условиях требуется многолетняя составляющая емкости $\beta_м=0{,}653$, причем $V_м=0{,}653\cdot 45{,}6=29{,}8$ млн. м³. Мертвый объем по условиям заиления принят равным $V_{м.о}=4{,}0$ млн. м³.

Общий объем водохранилища составляет

$$V_0=17{,}33+29{,}80+4{,}00=51{,}13 \text{ млн. м}^3.$$

Расчет полезной отдачи производится табличным способом по установленным величинам потерь (§ 8 и 14). Если задана полезная емкость, то отдача α находится подбором.

§ 13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВСЕЙ РАБОЧЕЙ ЕМКОСТИ, НЕ ДЕЛИМОЙ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ, БЕЗ УЧЕТА И С УЧЕТОМ МЕЖСЕЗОННОЙ СВЯЗИ СТОКА

Если кривыми обеспеченности характеризовать сток не за год, а за более короткие фазово-однородные периоды года (например, за весну, межень), то при суммировании этих кривых можно одновременно учесть не только годовые колебания стока, для регулирования которых необходима многолетняя составляющая емкости водохранилища, но также и внутригодовые колебания, требующие для поддержания обеспеченной отдачи дополнительную — сезонную составляющую емкости.

При этом в качестве исходных принимаются следующие положения [61]:

1) годовой цикл стока делится на генетически однородные фазы (обычно на половодье и межень);

2) распределение вероятностей стока каждой фазы выражается кривыми обеспеченности;

3) влияние стока предшествующей фазы на сток последующей оценивается коэффициентами корреляции;

4) распределение стока внутри фаз принимается в форме типовых гидрографов, изображающих ход стока по месяцам в зависимости от стока фазы в целом;

5) потребление воды на каждый момент работы установки считается известным. Оно может быть задано в форме правил водопотребления в зависимости от времени года и наполнения водохранилища. Такая зависимость изображается в виде диспетчерского графика;

6) задачей расчета является определение необходимого рабочего объема водохранилища. Если известны наполнение водохранилища в начальный момент, сток за фазу и отдача водохранилища за фазу, легко определяется наполнение к концу фазы. Конечное наполнение является начальным для следующей фазы. Тем самым устанавливается связь между режимами работы установки в смежные сезоны.

Если начальное наполнение водоема и сток за фазу представлены в виде кривых распределения вероятностей, то можно установить вероятность любого сочетания указанных элементов и, следовательно, получить кривую обеспеченности наполнений водохранилища в конце фазы. При этом, как показано в § 11, такая задача решается: 1) заменой кривой начальных наполнений ступенчатым графиком; 2) построением частных кривых обеспеченности конечных наполнений для каждого начального наполнения; 3) суммированием последних кривых.

Выполняя подобные построения с переходом от одной фазы к другой по ряду сменяющих друг друга фаз годового цикла (половодье, межень), можно получить стабильные кривые обеспеченности наполнений для моментов смены фаз независимо от предварительного наполнения, условно принимаемого в начале расчета.

При отсутствии межфазовых связей кривая обеспеченности стока фазы может считаться не зависимой от режима стока за предшествующую фазу.

При наличии межфазовой связи стока (коэффициент корреляции r') весь ход построений остается прежним, но каждому интервалу начальных наполнений соответствует своя частная кривая обеспеченности стока.

Так как связь между объемами стока за смежные сезоны бывает обычно слабо выражена, а ее учет мало изменяет результат расчета емкости, в большинстве случаев ею можно пренебречь. Однако и при этом расчеты и построения остаются все же громоздкими.

Расчеты по фазам стока при $r'=0$

Предварительно для каждой фазы стока (обычно для половодья и межени) строятся графики $\beta_к = \varphi(\beta_н, P)$, дающие конечное наполнение водохранилища в зависимости от начального наполнения и обеспеченного стока за фазу за вычетом отдачи за фазу. Если расчет ведется не в кубических метрах (см. § 11), а в относительных величинах (по отношению к среднему годовому стоку $Г_0$), то сток K, определяемый по статистическим параметрам для данной фазы (C_v, C_s, P), должен учитываться соответственно соотношению среднего стока за фазу к среднегодовому стоку (например, при $m=0{,}40$ надо учитывать для фазы весны $0{,}6K_в$, для фазы межени $0{,}4K_м$). Отдачу надо учитывать (при равномерном расходовании воды) пропорционально продолжительности фазы в долях от целого года.

Таблица 26

Расчет к построению номограммы $\beta_к=\varphi(\beta_н, P)$ для фазы весны

Продолжительность весеннего стока два месяца; средняя доля весеннего стока в годовом 0,60; $C_{vв}=0{,}84$; $C_{sв}=2C_{vв}$. Полезный объем $\beta_н=0{,}702$; $\alpha=0{,}62$

Обеспеченность притока P%	Начальное наполнение $\beta_н$	Приток за весну в долях от $Г_0$ ($0{,}60K_в$)	Отдача за весну $\frac{1}{6}\alpha$	Конечное наполнение $\beta_к=\beta_н+0{,}6K_в-\frac{1}{6}\alpha$
99,9	0,7	0,0036	0,104	0,7+0,0036—0,104=0,600
	0,6	0,0036	0,104	0,6+0,0036—0,104=0,500
	0,1	0,0036	0,104	0,1+0,0036—0,104=0,0
99	0,7	0,019	0,104	0,7+0,019—0,104=0,615
	0,6	0,019	0,104	0,6+0,019—0,104=0,515
	0,2	0,019	0,104	0,2+0,019—0,104=0,115
95	0,6	0,063	0,104	0,6+0,063—0,104=0,559
	0,3	0,063	0,104	0,3+0,063—0,104=0,259
	0,1	0,063	0,104	0,1+0,063—0,104=0,059
и т. д.				

Так, при $\alpha = 0{,}6$ отдача за фазу весны продолжительностью два месяца будет $0{,}6 \cdot 2 : 12 = 0{,}1$. Понятно, во всех случаях конечное наполнение должно ограничиваться размером полезной емкости водохранилища $\beta_п$.

Для иллюстрации расчета приводится рис. 47 и табл. 26 для фазы весны, а также табл. 27 для фазы межени.

Таблица 27

Расчет к построению номограммы $\beta_к = \varphi(\beta_н, P)$ для фазы межени

Продолжительность меженного стока 10 месяцев; средняя доля меженного стока в годовом $m = 0{,}40$; $C_{vм} = 0{,}55$; $C_{sм} = 2C_{vм}$. Полезный объем $\beta_п = 0{,}702$; $\alpha = 0{,}62$

Обеспеченность притока $P\%$	Начальное наполнение $\beta_н$	Приток за межень в долях от Γ_0 $(0{,}40K_м)$	Отдача за межень $\frac{5}{6}\alpha$	Конечное наполнение $\beta_к = \beta_н + 0{,}4K_м - \frac{5}{6}\alpha$
99,9	0,5	0,032	0,516	0,5+0,032—0,516=0,016
	0,6	0,032	0,516	0,6+0,032—0,516=0,116
	0,7	0,032	0,516	0,7+0,032—0,516=0,216
99,0	0,5	0,067	0,516	0,5+0,067—0,516=0,052
	0,7	0,067	0,516	0,7+0,067—0,516=0,252
95,0	0,4	0,120	0,516	0,4+0,120—0,516=0,004
	0,5	0,120	0,516	0,5+0,120—0,516=0,104
	0,6	0,120	0,516	0,6+0,120—0,516=0,204
и т. д.				

Переходя к построению кривых обеспеченности наполнений, следует вычертить ориентировочно одну из таких кривых, например, для конца межени (точность предварительного очертания кривой не влияет на окончательный результат, а лишь увеличивает или уменьшает количество построений). Затем эта кривая разбивается на несколько ступеней, заменяющих трапецеидальные площадки отдельных участков кривой на равновеликие прямоугольники. Принимая высоту каждой ступени за начальное наполнение, а длину ее за 100%, строим в пределах каждой из них условную кривую обеспеченности конечных наполнений по рис. 47 *а*.

Для удобства отложения точек условных кривых абсциссы их в пределах ступени следует пересчитывать на миллиметры. Если в ступени содержится 36 мм, т. е. 0,36 мм в каждом проценте, то на условной кривой, например, точку $\beta_к = 0{,}54$ и $P = 80\%$ надо отложить на высоте 0,54 (в данном случае не от ступени, как в § 11, а от общей оси x, так как в построении графика на рис. 47 отдача учтена) и на расстоянии $0{,}36 \cdot 80 = 28{,}8$ мм вправо от начала ступени. Если исходными были ступени кривой обеспеченности наполнений для конца межени, то условные кривые в пределах каждой ступени строятся по графику 47 *а* (для весны), поскольку по наполнениям к концу межени надо находить наполнения к концу весны.

Наполнения к концу весны находятся суммированием абсцисс всех условных кривых (в миллиметрах или в процентах) для

одинаковых ординат. Так, на рис. 48 *а* искомая точка для заполненного водохранилища к концу весны (ордината $\beta_н=0{,}702$) определится как сумма отрезков $AB+CD+EF+GH+KL+MN+OP+RS=AT$. Таким же образом находятся абсциссы для ординат любого промежуточного наполнения и строится кривая обеспеченности наполнений к концу весны. Полученная кривая снова разбивается на

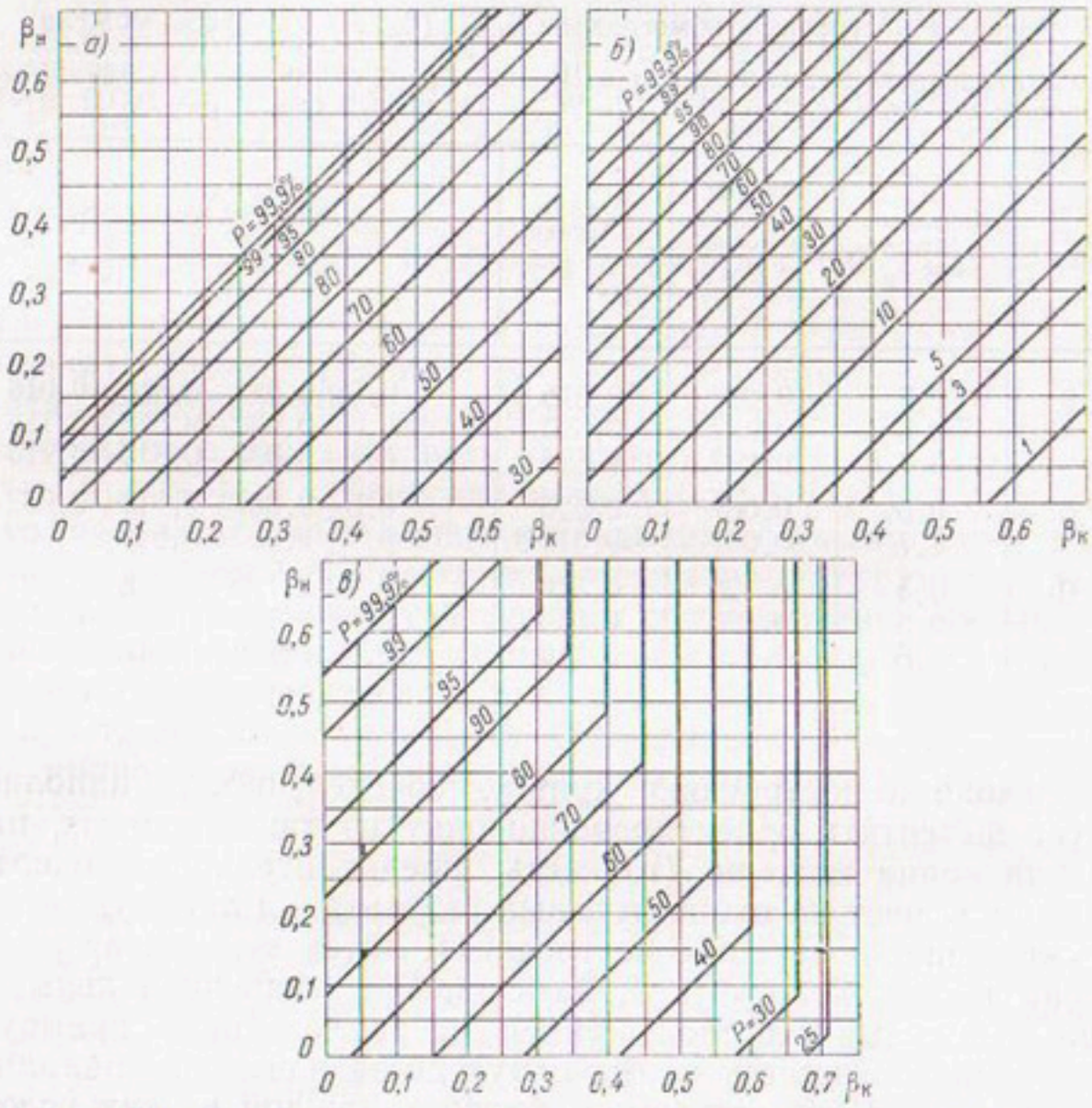


Рис. 47. Номограмма $\beta_к=\varphi(\beta_н, P)$ раздельно по фазам стока (*а* и *б*) и по году в целом (*в*).

а — фаза половодья ($C_в=0{,}84$, $1-m=0{,}60$, $t'=2:12=0{,}167$); *б* — фаза межени ($C_в=0{,}55$, $m=0{,}40$, $t=10:12=0{,}833$); *в* — год в целом ($C_{вг}=0{,}55$, $C_s=2C_{вг}$, $m=0{,}40$).

ступени, для каждой из которых строится условная кривая по рис. 47 *б* (поскольку переходим к построению кривой обеспеченности наполнений для конца межени, рис. 48 *б*). Построения прекращают, когда кривые обеспеченности наполнений примут стабильные формы, т. е. кривая для конца весны не будет отличаться от предшествовавшей кривой к концу весны, а кривая для конца межени не будет отличаться от аналогичной предшествовавшей кривой.

Стабильные кривые обеспеченности наполнений для конца весны и конца межени являются искомыми (рис. 48).

Обеспеченность работы водохранилища при этом определяется по точке пересечения кривой наполнений в конце межени с осью P.

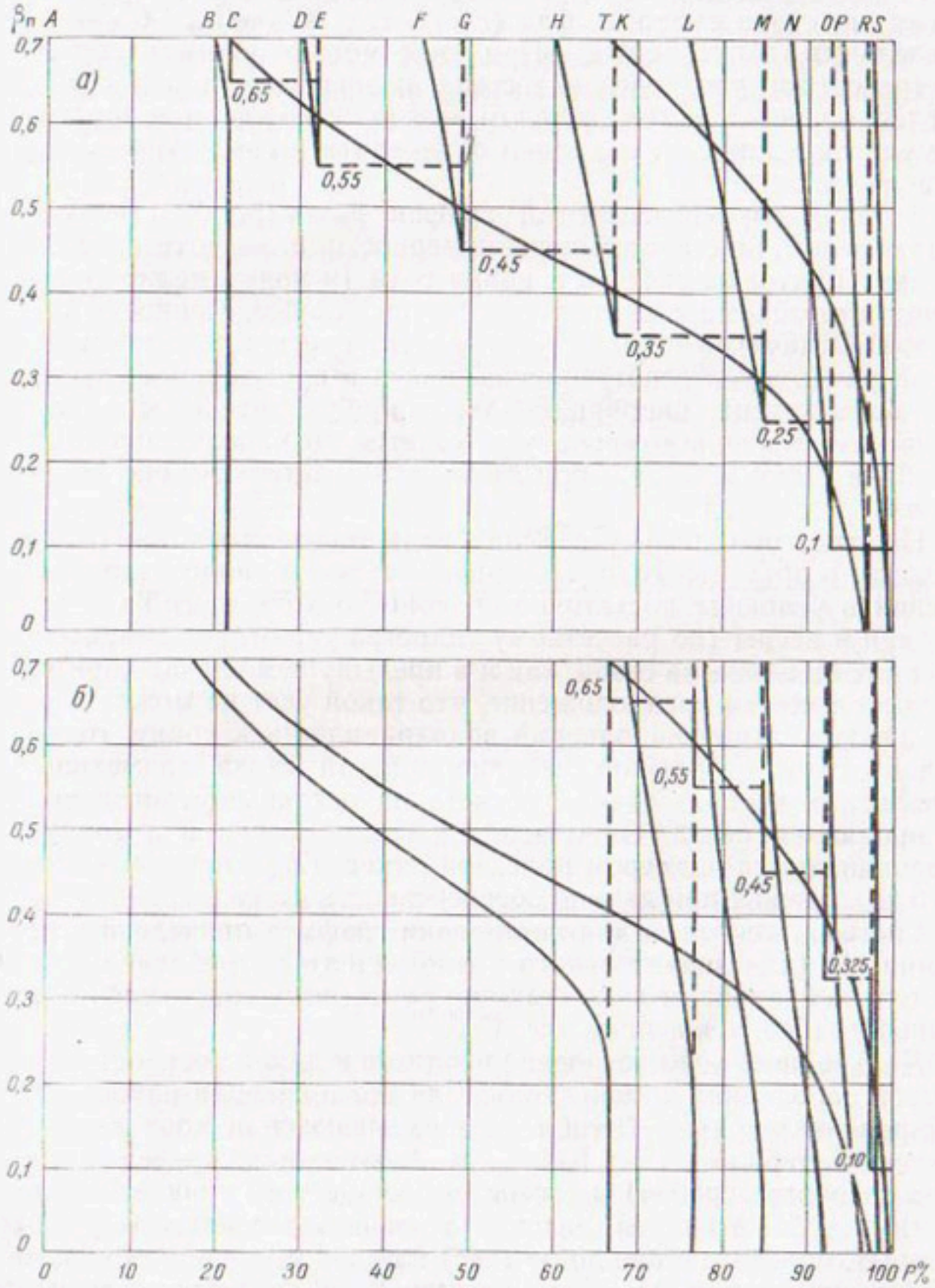


Рис. 48. Построение кривых обеспеченности наполнений водохранилища при разбивке годового стока на две фазы.

а — фаза половодья, *б* — фаза межени.

Так строятся кривые обеспеченности наполнений при отсутствии связи между величинами стока смежных фаз.

Расчеты по стоку за год в целом при $r'=1$

Менее трудоемки построения при наличии полной связи между объемами стока смежных фаз ($r'=1$, т. е. $C_{vв}=C_{vм}=C_{vг}$ — случай предельный, допускаемый). При этом можно принять постоянное внутригодовое распределение стока, независимо от водности года. Тогда в расчетах по году в целом можно легко учесть и внутригодовое регулирование, т. е. заодно определить и сезонную составляющую емкости.

В таком случае расчетный график $\beta_к=\varphi(\beta_н, P)$ строится для года в целом, но с учетом неравномерности стока в течение года, и по нему получают объемы к концу года (к концу межени) в зависимости от объема к началу года (весны) и обеспеченности притока за год. Отдача по сезонам учитывается соответственно заданной, а для равномерного потребления, как и в предыдущем случае, может быть учтена пропорционально продолжительности сезонов. Наполнение к концу сезона учитывается по наполнению к началу сезона и стоку за сезон, при этом исключается отдача за то же время.

Поэтому наполнения к концу года подсчитываются от сезона к сезону в пределах года. При равномерном и значительном потреблении в условиях достаточно спокойного хода притока в течение межени и весны (по расчетному гидрографу) отдача и приток учитываются в целом за сезон, как и в предыдущем случае (при $r'=0$). Если же имеется предположение, что такой учет не может отразить реальную картину наполнений водохранилища к концу года (при малой отдаче и большой неравномерности стока за межень), то наполнения в обеих схемах расчета находятся внутригодовым регулированием стока. Наполнения к концу сезона и к концу года ограничиваются размером полезной емкости $\beta_п$ и пределом возможного наполнения при данной обеспеченности стока.

Система подсчетов для построения графика приведена в приложении III (для значительного равномерного потребления при сравнительно спокойном ходе стока по расчетному гидрографу), а расчетный график показан на рис. 47 *в*.

Дальнейший ход построений сводится к нахождению стабильной кривой наполнений к концу года. Для этого сначала наносится ориентировочная кривая. В табл. 28 записываются ее координаты: ряд значений от $\beta_{исх}=\beta_п$ до $\beta_{исх}=-\alpha$ (возможная предельная величина годового перебоя) и соответствующие этим точкам обеспеченности по той же кривой. Затем она разбивается на ступени, длины которых, определяющие долю (вес) каждой ступени в общем числе комбинаций, равны $\Delta P=P_к-P_н$ (где $P_н$, $P_к$ — соответственно обеспеченности начала и конца ступени).

Принимая высоту каждой ступени за начальное наполнение $\beta_н$, а ординаты кривой $\beta_{исх}$ за конечное $\beta_к$, находим по номограмме $\beta_к=\varphi(\beta_н, P)$ (рис. 47 *в*) соответствующие величины $P\%$. Умножая последние на ΔP, получаем абсолютные обеспеченности $P\Delta P$ для всех ординат $\beta_{исх}$, относящиеся к данной ступени. То же выполня-

ется для каждой ступени. Суммированием величин $P\Delta P$ по всем ступеням определяется результирующая абсцисса для каждой ординаты $\beta_{исх}$. Если итоговые абсциссы точек кривой практически не отличаются от исходных, то окончательная кривая найдена (рис. 49), а когда разности абсцисс превышают 0,2—0,3%, то полученная кривая снова разбивается на ступени, и расчет повторяется второй (или третий) раз, т. е. до получения установившейся кривой обеспеченности наполнений, которая практически не отличается от предыдущей.

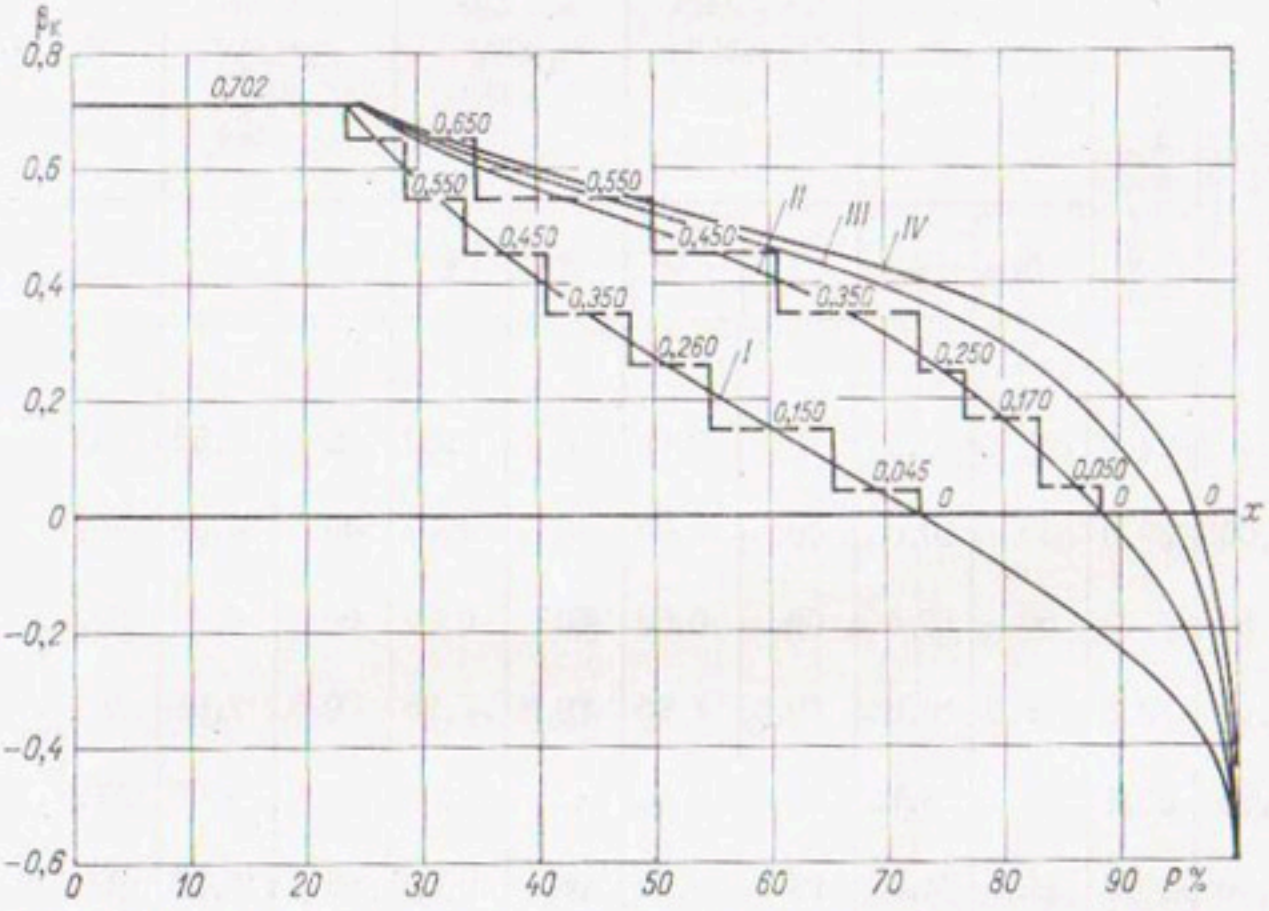


Рис. 49. Кривые обеспеченности наполнений водохранилища к концу года (к началу весны) из расчета по году в целом при $\alpha=0{,}62$, $\beta_п=0{,}702$, $C_{вг}=0{,}55$, $C_в=2C_{вг}$, $m=0{,}40$.

I — к концу 1-го года, *II* — к концу 2-го года, *III* — к концу 3-го года, *IV* — установившаяся кривая.

Как и в первой схеме (при $r'=0$), обеспеченность определяется по точке пересечения кривой с осью P.

Из приведенного видно, что расчет по году в целом с упрощенным внутригодовым регулированием (при $r'=1{,}0$) позволяет заодно построить кривую величин годовых дефицитов воды за пределами расчетной обеспеченности (например, от $P=97\%$ до $P=100\%$), что является важной характеристикой водохранилища. Подробнее этот вопрос, как и режим сбросов, освещается в гл. VI.

По этой же схеме при необходимости может быть построена кривая обеспеченности наполнений только многолетней емкости. В таком случае внутригодовое регулирование не выполняется, а отдача и приток при построении рис. 47 *в* учитываются целиком за год.

Определение координат кривой обеспеченности наполнений водохранилища

$\beta_{п}=0{,}702$; $C_{vг}=0{,}55$;

Ординаты точек кривой $\beta_{исх}$	Исходные абсциссы точек кривой $P_{исх}$ %	Расчетные									
		$\beta_1=0{,}702$ $P_н=0{,}0$ $P_к=25{,}0$ $\Delta P=25{,}0$		$\beta_2=0{,}670$ $P_н=25{,}0$ $P_к=35{,}0$ $\Delta P=10{,}0$		$\beta_3=0{,}600$ $P_н=35{,}0$ $P_к=45{,}0$ $\Delta P=10{,}0$		$\beta_4=0{,}540$ $P_н=45{,}0$ $P_к=55{,}0$ $\Delta P=10{,}0$		$\beta_5=0{,}480$ $P_н=55{,}0$ $P_к=67{,}0$ $\Delta P=12{,}0$	
		P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$
0,702	24,9	25	6,25	25	2,50	25	2,50	25	2,50	25	3,00
0,60	39,3	40	10,0	40	4,00	40	4,00	40	4,00	40	4,80
0,50	57,3	60	15,0	60	6,00	60	6,00	60	6,00	60	7,20
0,40	73,8	79,5	19,88	79,5	7,95	79,5	7,95	79,5	7,95	79	9,48
0,30	85,1	95	23,75	95	9,50	93,3	9,33	90	9,00	87,5	10,5
0,20	90,8	99,5	24,88	99	9,90	98	9,80	95	9,50	93	11,16
0,10	94,4	100	25,0	100	10,00	99,5	9,95	98	9,80	97	11,64
0,0	96,8	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	99,5	11,94
—0,10	98,3	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	100	12,00
—0,20	99,2	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	100	12,00
—0,30	99,6	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	100	12,00
—0,40	99,9	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	100	12,00
—0,50	100	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	100	12,00
—0,62	100	100	25,0	100	10,00	100	10,00	100	10,00	100	12,00

Таблица 28

к концу года (к концу межени) из расчета по году в целом ($\alpha=0{,}62$; $C_s=2C_{vr}$; $m=0{,}4$)

интервалы												
$\beta_6=0{,}410$ $P_н=67{,}0$ $P_к=77{,}5$ $\Delta P=10{,}5$		$\beta_7=0{,}350$ $P_н=77{,}5$ $P_к=82{,}5$ $\Delta P=5{,}0$		$\beta_8=0{,}300$ $P_н=82{,}5$ $P_к=88{,}0$ $\Delta P=5{,}5$		$\beta_9=0{,}227$ $P_н=88{,}0$ $P_к=91{,}5$ $\Delta P=3{,}5$		$\beta_{10}=0{,}100$ $P_н=91{,}5$ $P_к=97{,}0$ $\Delta P=5{,}5$		$\beta_{11}=0{,}0$ $P_н=97{,}0$ $P_к=100{,}0$ $\Delta P=3{,}0$		Результирующие абсциссы точек кривой $P_к=\sum P\Delta P$
P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	P	$P\Delta P$	
25	2,62	25	1,25	25	1,38	25	0,88	25	1,38	24	0,72	25,0
40	4,20	40	2,00	40	2,20	40	1,40	34	1,87	29	0,87	39,34
60	6,30	58	2,90	55	3,02	50	1,75	41	2,26	34,5	1,03	57,46
74	7,77	69	3,45	64,5	3,55	57,5	2,01	48	2,64	41	1,23	73,86
82,5	8,66	77,5	3,88	73	4,02	66	2,31	55,5	3,05	48,5	1,45	85,4
89	9,34	85	4,25	81	4,46	74,5	2,61	64	3,52	56	1,68	91,1
94	9,87	91,5	4,58	88,5	4,87	82,5	2,89	72,5	3,99	64,5	1,93	94,5
98	10,29	96	4,80	94	5,17	89,5	3,13	81,3	4,47	73	2,19	96,99
100	10,50	98,7	4,94	97,7	5,37	94,5	3,31	88,5	4,87	81	2,43	98,4
100	10,50	100	5,00	99,5	5,47	98	3,43	94	5,17	88,5	2,65	99,2
100	10,50	100	5,00	100	5,50	100	3,50	97,5	5,36	94	2,82	99,68
100	10,50	100	5,00	100	5,50	100	3,50	99,5	5,47	98	2,94	99,9
100	10,50	100	5,00	100	5,50	100	3,50	100	5,50	99,5	2,98	99,98
100	10,50	100	5,00	100	5,50	100	3,50	100	5,50	100	3,00	100

Обе изложенные схемы построения кривых обеспеченности наполнений всей емкости $\beta_п$ имеют известные преимущества перед раздельным определением многолетней и сезонной емкостей водохранилища.

На основе кривых наполнений можно построить кривые обеспеченности площадей затопления, напоров и других водохозяйственных элементов как для концов фаз стока, так и для других моментов времени, например, для середины межени (1/X). В этом случае можно воспользоваться кривой обеспеченности наполнений для конца межени, изменив ее ординаты на величину сток минус отдача за интервал (1/X—1/III).

Кроме этих качеств, построение кривых обеспеченности наполнений всей емкости $\beta_п$ по фазам стока (или по году в целом) устраняет некоторую погрешность расчета, вносимую схематизацией определения сезонной составляющей емкости при раздельном определении $\beta_м$ и $\beta_с$. Учитывая это обстоятельство, Я. Д. Гильденблат и В. Р. Казак построили региональные номограммы для рек Донецкого бассейна, позволяющие определять непосредственно всю полезную емкость $\beta_п$ для заданных α и $P\%$ (или путем простейшего подбора находить α при заданных $\beta_п$ и $P\%$). Номограммы учитывают как изложенные выше построения по фазам стока, так и возможные различия в коэффициентах вариации стока межени и года. [При раздельном определении составляющих емкости водохранилища величина $\beta_с$ находится нередко по году со стоком $K=\alpha$ и $K_м=\alpha$ соответственно формуле (47), что удовлетворяет равенству $C_{vг}=C_{vм}$. Это равенство соблюдается не всегда, поэтому требуются поправки к расчету.]

Номограммы построены с предварительным определением составляющих емкости: многолетней — по графикам Я. Ф. Плешкова, сезонной — по формуле (45). Затем для нескольких сочетаний α и $\beta_п$ были проведены уточняющие расчеты по фазам стока с построением стабильных кривых обеспеченности наполнений к концу каждой фазы (с учетом $C_s=2C_v$ и $r'=0$).

Для низких степеней сезонного регулирования размеры водохранилища были определены с учетом неравномерности стока на протяжении межени. Для расчета были приняты: коэффициенты $C_{vг}=0{,}4\div0{,}8$; коэффициенты $C_{vм}=0{,}4\div0{,}6$; средняя доля межени в годовом стоке $m=0{,}3\div0{,}5$; расчетная обеспеченность $P=95\div97\%$.

Основная часть каждой номограммы показывает всю полезную емкость $\beta_п$ при $C_{vг}=C_{vм}$, к ней дается график поправок $\Delta\beta$, дополняемых (с учетом знака) к величине $\beta_п$ в случае, если коэффициенты $C_{vг}$ и $C_{vм}$ отличаются. При $C_{vг}=0{,}7\div0{,}8$ поправки незначительны и потому не учитываются. Упомянутые номограммы для $P=97\%$ показаны на рис. 50—52.[1]

[1] Во втором издании книги рисунки перемещены, причем под рис. 50 показано $m=0{,}3$, вместо 0,5, а под рис. 52 — $m=0{,}5$, вместо 0,3. В этой книге ошибка устранена.

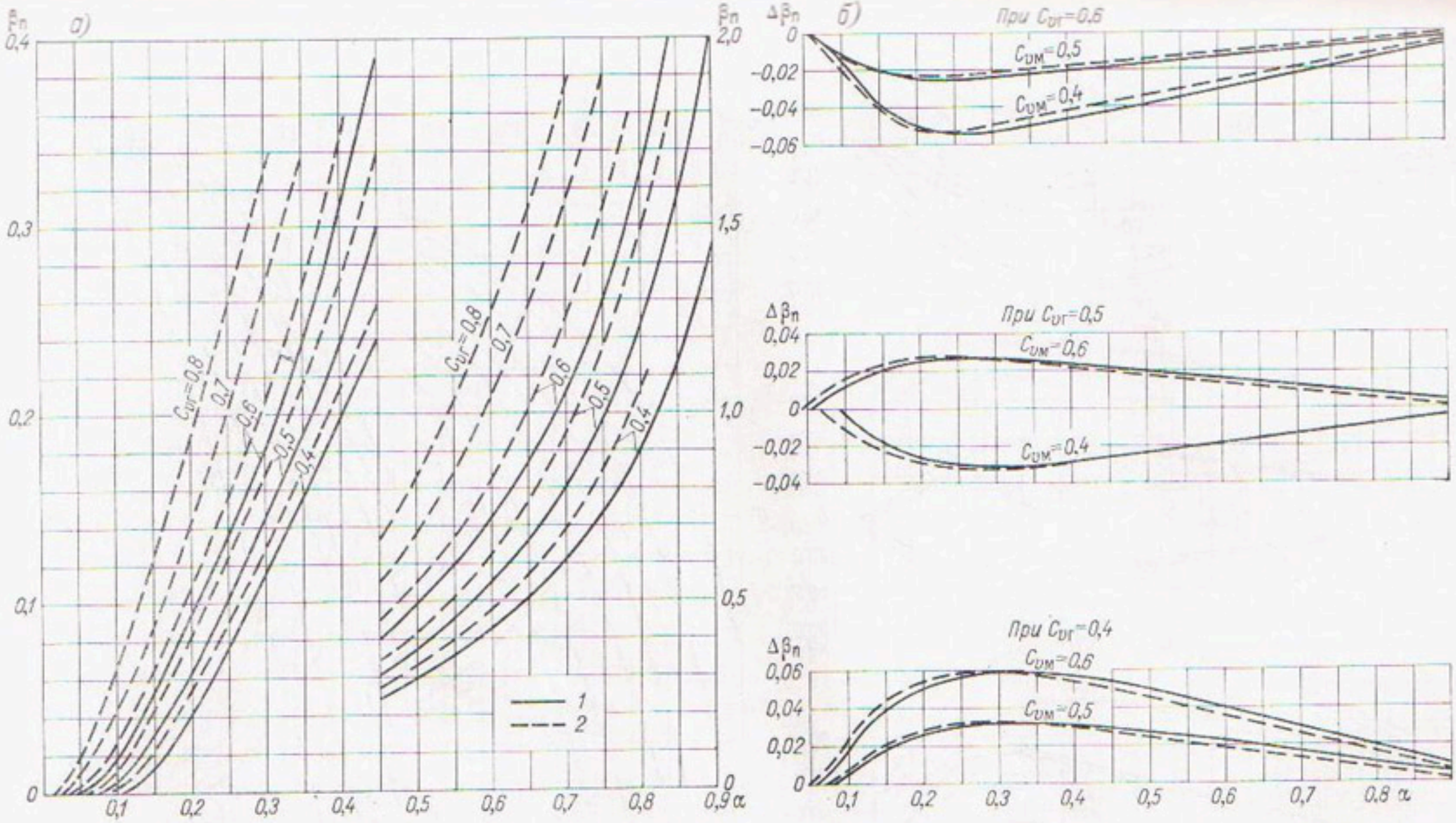


Рис. 50. Номограмма Я. Д. Гильденблата и В. Р. Казака для расчета всей полезной емкости водохранилища ($\beta_п$) при n=0,3, $C_s=2C_v$, $r=0$.

а — кривые $\beta_п=f(\alpha, C_{vг})$, *б* — кривые поправок $\Delta\beta_п=f(\alpha, C_{vм})$; *1* — P=95%, *2* — P=97%.

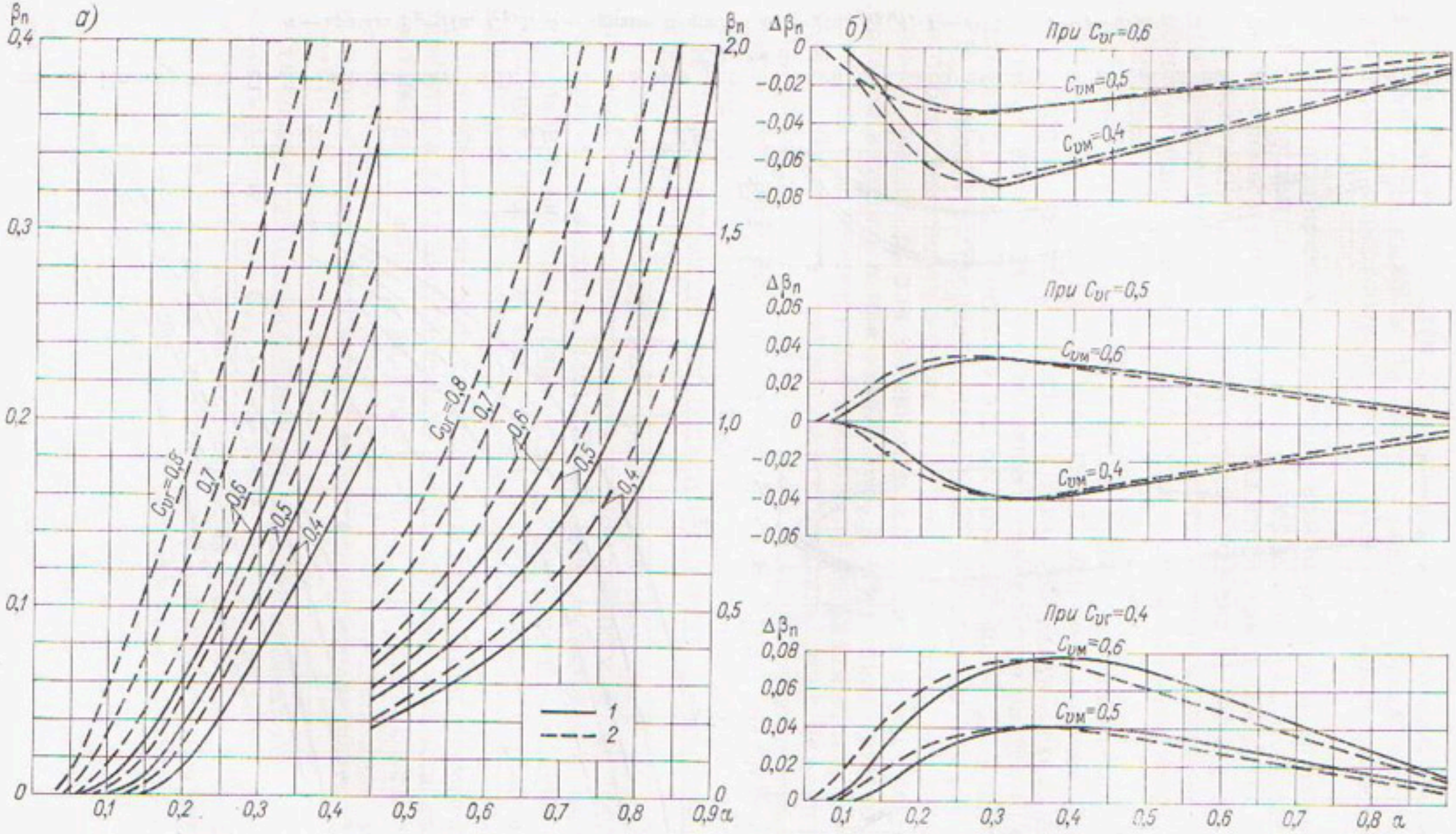


Рис. 51. Номограмма Я. Д. Гильденблата и В. Р. Казака для расчета всей полезной емкости водохранилища при $m=0{,}4$, $C_s=2C_v$, $r=0$.

а — кривые $\beta_п=f(\alpha, C_{vг})$, *б* — кривые поправок $\Delta\beta_п=f(\alpha, C_{vм})$; *1* — $P=95\%$, *2* — $P=97\%$

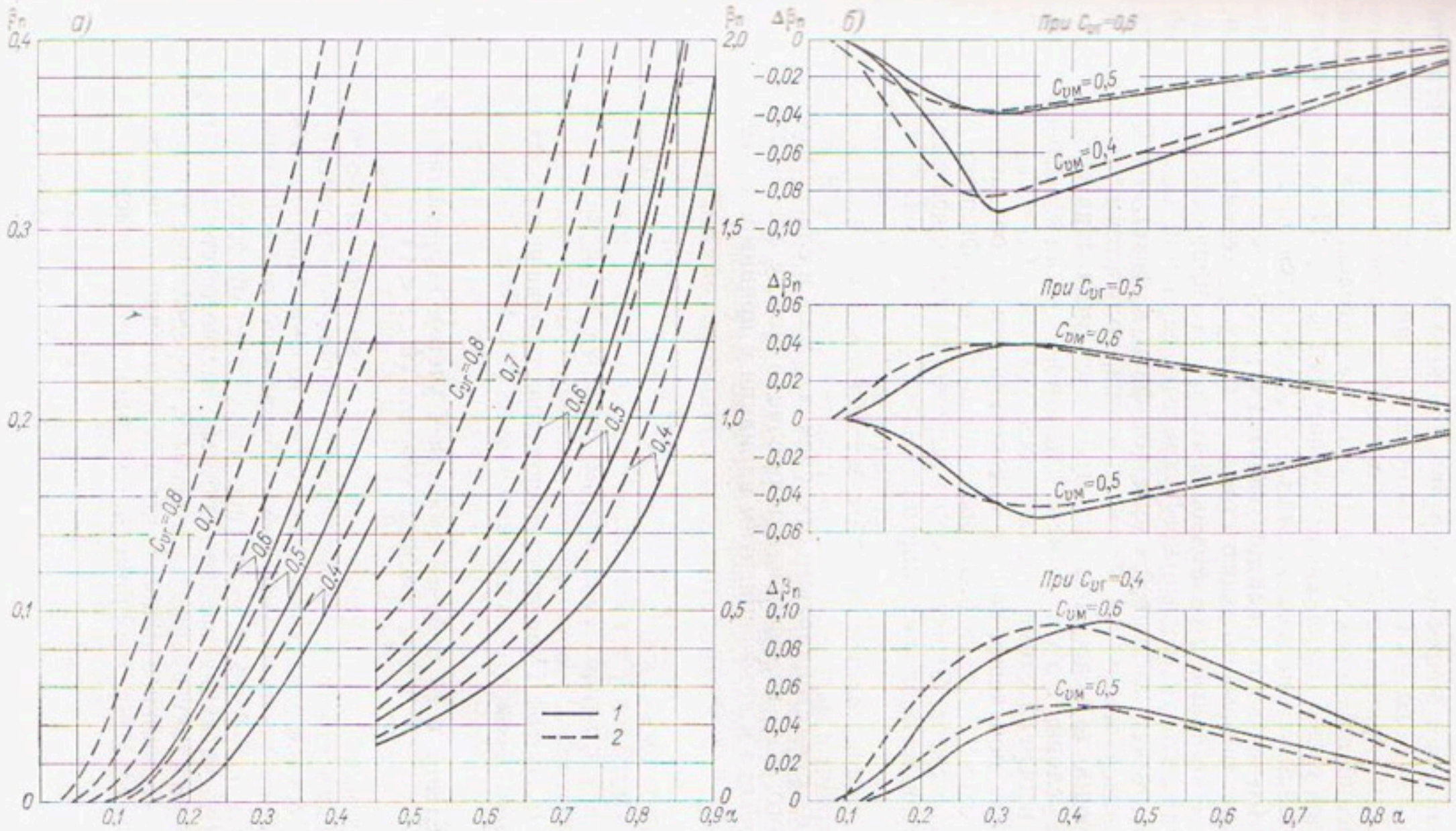


Рис. 52. Номограмма Я. Д. Гильденблата и В. Р. Казака для расчета всей полезной емкости водохранилища при $m=0{,}5$, $C_s=2C_v$, $r=0$.

а — кривые $\beta_п=f(\alpha, C_{vг})$, *б* — кривые поправок $\Delta\beta_п=f(\alpha, C_{vм})$; *1* — $P=95\%$, *2* — $P=97\%$.

Заканчивая вопрос об определении всей полезной емкости при $r'=0$ и $r'=1$, во избежание ошибок при расчетах напомним, что параметры, принимаемые для построения кривой обеспеченности наполнений по второй схеме ($r'=1$), непригодны для построений по первой схеме (по отдельным фазам при $r'=0$). При построениях по второй схеме, например, для $C_{vг}=0{,}55$, имеется в виду, что $C_{vм}=C_{vв}=C_{vг}=0{,}55$, так как допускается строгая пропорциональность в делении объема годового стока на весну и межень (например, $m=0{,}40$) независимо от водности года, т. е. принимается $r'=1{,}0$.

Если взять указанные коэффициенты вариации $C_{vв}=C_{vм}=0{,}55$ и вести расчет по первой схеме (от фазы к фазе), но без учета связи между сезонными объемами стока, получится более высокая обеспеченность водоотдачи для той же емкости. Иначе говоря, исходные условия в этом примере для той и другой схем несравнимы. Чтобы в первой схеме соблюдалось условие $C_{vг}=C_{vм}=0{,}55$ при $r'=0$, для получения той же обеспеченности водоотдачи, что и по второй схеме, должен быть более высокий коэффициент вариации весеннего стока. Это следует из выражения для дисперсии суммы варьирующих членов сложного ряда [59]

$$\sigma_z^2=\sigma_1^2+\sigma_2^2+2r'\sigma_1\sigma_2, \tag{48}$$

где σ_z, σ_1, σ_2 — стандартные отклонения суммы и слагаемых первого и второго; r' — коэффициент корреляции между слагаемыми.

Переходя к коэффициентам вариации и принимая $r'=0$, найдем для нашего примера

$$(C_{vг}\cdot 1)^2=(C_{vм}\cdot 0{,}40)^2+(C_{vв}\cdot 0{,}60)^2,$$

или

$$(0{,}55\cdot 1)^2=(0{,}55\cdot 0{,}40)^2+(C_{vв}\cdot 0{,}60)^2,$$

откуда $C_{vв}=0{,}84$. При этом обеспеченность отдачи в обоих случаях будет одинакова, что и показано на рис. 48 и 49.

Определение всей рабочей емкости с учетом корреляционной связи стока смежных сезонов ($0<r'<1$)

Тенденция к сохранению аномалий стока проявляется в том, что за высоким стоком, давшим большое заполнение водоема, вероятнее всего, сток следующей фазы будет тоже сравнительно высоким. И наоборот, после низкого стока, обусловившего малое наполнение, сток следующей фазы, вероятнее всего, будет относительно низким.

Для вычисления среднего объема частного стока следующей фазы y по стоку предыдущей фазы x, определившему частное конечное — начальное наполнение водохранилища на некотором участке кривой $V=f(P)$, применяется уравнение регрессии

$$y=\bar{y}+r_{yx}\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x-\bar{x}). \tag{49}$$

Стандартное отклонение частного стока следующей фазы равно

$$\sigma_y^{(x)} = \sigma_y \sqrt{1 - r_{yx}^2}. \quad (50)$$

В формулах (49) и (50) $\overline{x}$ и $\overline{y}$ — средние значения стока той и другой фазы (сезона); x и y — средние частные значения стока за те же фазы; σ_x и σ_y — стандартные отклонения стока за те же фазы; r_{yx} — коэффициент корреляции между стоком половодья и последующей межени (r_{xy} — то же между стоком половодья и предшествующей межени; для упрощения принимают одну связь, основную и более реальную, например r_{yx}); $r_{yx}\sigma_y : \sigma_x = R_{yx}$ — коэффициент регрессии в уравнении для частного стока последующей фазы. Коэффициенты изменчивости частного стока за последующие фазы находятся по соотношению

$$C_v = \sigma_y^{(x)} : y. \quad (51)$$

Расчет выполняется обычным построением кривых $V = f(P)$ для моментов смены фаз (с учетом начального наполнения и с исключением отдачи) в следующем порядке.

1. За исходное удобно принять пустое водохранилище к началу половодья. Кривая обеспеченности стока половодья в нижней зоне срезается на высоту отдачи. Выше располагается зона полезной емкости (рис. 43 *в*), в пределах которой кривая заменяется ступенями. При этом весь участок кривой, давший заполнение водохранилища со сбросами, заменяется одной равновеликой ступенью x' той же ширины.

2. По уравнениям (49)—(51) и по выделенным ступеням x (а для ступени полного водоема учитывается x') находим соответствующие каждой ступени частные значения среднего y и C_v для стока следующей фазы (межени). Коэффициент C_s для всех ступеней и фаз принимается постоянным (например, $C_s = 2C_v$).

3. Построив частные кривые обеспеченности фазы межени (y) над ступенями наполнений в конце половодья (напомним, что x' — не наполнение, а сток) и выделив отдачу этой фазы, а над ней — зону полезной емкости (рис. 43 *в*), в пределах последней производим суммирование кривых и получаем общую кривую $V = f(P)$ в конце межени.

4. Эта кривая заменяется графиком со ступенями — начальными объемами для фазы половодья (x) второго года, которое по всем ступеням и годам представляется одной и той же первичной кривой обеспеченности, если между стоком межени и весны $r \approx 0$. Как и в п. 3, выполняем построения и суммирование частных кривых обеспеченности наполнений в конце половодья и получаем для этого момента общую кривую, разделяемую на ступени.

5. Поскольку ступени к началу фазы x были различны, то наполнение в конце этой фазы в виде полной емкости (или других ступеней — вариантов наполнения), объединяемое по всем ступеням, произошло за счет различных участков частных кривых

обеспеченности стока за половодье, т. е. за счет различных значений x. Чтобы определить средневзвешенный объем стока x, вызвавший наполнение водохранилища, например до НПГ, следует на каждой частной кривой стока выделить зону, давшую наполнение и сбросы. Весь участок этой зоны кривой заменяется равновеликой ступенью той же ширины. То же выполняется для всех частных кривых при подсчетах наполнения до НПГ и для нескольких других вариантов конечного наполнения — $0{,}75V_{\text{п}}$, $0{,}5V_{\text{п}}$, $0{,}25V_{\text{п}}$ и 0,0 (с учетом отдачи). Искомый весенний сток, давший наполнение до НПГ (как и для других наполнений), подсчитывается по соотношению

$$x^{(1)} = \frac{x_1^{(1)} n_1^{(1)} + x_2^{(1)} n_2^{(1)} + \dots}{n_1^{(1)} + n_2^{(1)} + \dots}. \qquad (52)$$

Здесь верхний индекс — номер конечного наполнения (полная емкость — (1), $0{,}75V_{\text{п}}$ — (2) и т. д.); нижний индекс — номер частных кривых к началу половодья; x — средний сток зон половодья, дающий рассматриваемое наполнение в конце фазы x; n — вес этих зон в долях общего основания графика.

6. По найденным величинам $x^{(1)}$, $x^{(2)}$ и т. д. определяем соответствующие им объекты стока y и C_v [по формулам (49)—(51)], по которым строим частные кривые стока y по ступеням наполнений в конце половодья и т. д.

Расчет продолжается до получения стабильных кривых $V = f(P)$ в концах фаз x и y. По точке пересечения кривой с осью P маловодной фазы судят об обеспеченности отдачи. Если полученное значение $P\%$ не удовлетворяет заданию, изменяют емкость водохранилища или его отдачу и весь расчет выполняют заново.

Если учитывать также связь между стоком межени и последующего половодья, то аналогично пришлось бы определять величины стока межени y, вызвавшие то или иное наполнение к концу ее, а затем по связи находить соответствующие значения x и C_v для половодья. В связи со сложностью расчетов корреляционная связь по фазам стока используется лишь в особых случаях. В обычных же условиях проектирования эта связь не учитывается, даже если она существенна, так как влияние ее, как показывает опыт, невелико, особенно если сток одной из фаз незначителен по сравнению со стоком другой.

Расчеты по методу Монте-Карло (прием фрагментов)

Исходный для расчетов длительный ряд величин стока создается двойной выборкой, причем первая относится к среднегодовым расходам (см. § 11), вторая — к фрагментам.

Фрагментом, по Г. Г. Сванидзе, называется наблюденный в данном створе реки гидрограф из среднемесячных или декадных расходов в относительных ординатах — долях среднего расхода за тот же год. Число фрагментов равно числу наблюденных гидрографов стока. Распределяя их по моделируемому ряду (в 500, 1000 и

больше лет), получаем множество вариантов годовых и внутригодовых колебаний стока (гидрографов).

При отсутствии связи между водностью года и внутригодовой неравномерностью стока распределение фрагментов по длительному ряду лет достигается тем, что одновременно с выборкой годовых расходов производится выборка пронумерованных фрагментов. Извлекаемый из урны (с последующим возвратом) номер, т. е. фрагмент, относится к получаемому одновременно, по таблице случайных чисел, среднегодовому расходу. Умножая на него относительные ординаты соответствующего фрагмента, находим гидрограф этого года, как и каждого года всего моделируемого ряда.

При этом может быть учтена корреляционная связь между смежными годами, а также между годовым стоком и его внутригодовой неравномерностью [108].

Полученные ряды гидрографов используются в практике так же, как и наблюденные.

Однако весьма расширенная и более полная информация о стоке позволяет точнее выявить емкость водохранилища и особенности режима установки при разнообразных комбинациях стока.

Большая трудоемкость расчетов преодолевается с помощью ЭВМ.

Глава VI

ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩА В ПРОЕКТНЫХ УСЛОВИЯХ И ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ОТ НИХ

Наряду с установлением объема водохранилища требуется определить период его сработки, полезную отдачу, вероятные перебои, сбросы и другие элементы работы установки в стационарных условиях. Вместе с тем необходимо осветить возможные изменения отдачи водохранилища при том или ином отклонении гидрологических и водохозяйственных параметров от их проектных значений. Особым неустановившимся режимом отличается работа водохранилища в пусковой период со многими его отклонениями от нормальных условий. Ниже приводится описание всех этих важных характеристик установки.

§ 14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ СРАБОТКИ ВОДОХРАНИЛИЩА, РАСЧЕТ ПОЛЕЗНОЙ ОТДАЧИ И СБРОСОВ

Общие сведения

После появления первого обобщенного метода расчета регулирования стока [60] вопрос о продолжительности опорожнения водохранилища почти никем не исследовался. Лишь в 1947 г. дано обоснованное представление о периодах сработки водохранилищ. Решение этого вопроса в данной книге несколько отличается по приемам расчетов от работы [61], но имеет с ней близкое сходство как в исходных принципиальных положениях, так и в результатах.

Под периодом сработки понимается продолжительность полного опорожнения водохранилища, целиком заполненного к началу маловодья. Период сработки водохранилища при его гарантированном режиме имеет существенное значение в водохозяйственном проектировании. Этот параметр связан с притоком к водохранилищу для расчетной обеспеченности, а значит и с колебанием его уровней в том же расчетном случае.

Решение вопроса об изменении подпорных отметок водохранилища за время его сработки совершенно необходимо как для гидроэнергетических расчетов (для определения напоров и мощностей), так и для специальных исследований (для определения

характеристики солевого режима водохранилища, для подсчета потерь на испарение и т. д.).

Из аналитических приемов водохозяйственных расчетов единственным методом, дающим наряду с объемом водохранилища (для заданной водоотдачи α) также и период его сработки, является первый метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1930 г.).

Как показывает произведенное сравнение по нескольким объектам на реках Днепре, Южном Буге, Северском Донце и других с продолжительными (50 лет и более) наблюдениями за стоком, периоды сработки, определенные по методу 1930 г., довольно хорошо соответствуют действительности. Это обстоятельство приводит к мысли, что объем водохранилища следует определять, например, по второму методу Крицкого и Менкеля (1935 г.), а при выборе периода сработки можно ограничиться данными первого метода. Но не вполне строгая методическая основа метода 1930 г. и сомнения в возможной случайности результатов при расчетах по фактическим рядам стока требуют обоснования периода сработки водохранилища с использованием обобщенных характеристик.

Установление и анализ периодов сработки водохранилища

Согласно работе [61], определение периодов сработки производится последовательным суммированием кривых обеспеченности наполнений водохранилища (начиная с полного) и кривых обеспеченности годового стока при одновременном исключении объема водоотдачи. В результате к концу первого года вероятность опорожнения водохранилища будет составлять p_1, а вероятность промежуточных наполнений S_1. Суммируя участок S_1 с кривой обеспеченности годового стока и вычитая отдачу, найдем вероятность двухлетних перебоев, относительную p_2 и абсолютную S_1p_2.

Таким же образом находится вероятность опорожнений за три, четыре года и т. д. При этом вероятность, отвечающая опорожнению водохранилища за i лет, выразится произведением

$$s_i = S_1 S_2 \ldots S_{i-1} p_i. \tag{53}$$

Сумма указанных вероятностей для значений i от $i=1$ до $i \to \infty$ равна общему числу случаев перебоя. Если принять эту сумму за единицу, то условные вероятности различной длительности опорожнения n будут составлять

$$\frac{S_1 S_2 \ldots S_{n-1} p_n}{\sum_{i=1}^{i=\infty} S_1 S_2 \ldots S_{i-1} p_i} = \frac{s_n}{\sum_{i=1}^{i=\infty} s_i}. \tag{54}$$

На основе изложенного Крицкий и Менкель построили кривые наиболее вероятных периодов сработки $n = \varphi(\beta_м, \alpha)$ по трем значениям C_v, равным 0,60; 0,40; 0,20 и трем значениям α, равным 0,60; 0,80 и 0,95 (рис. 53).

Одновременно и автором был исследован вопрос опорожнения водохранилищ на основе иной техники расчетов по методу 1935 г. Материалом для исследования послужили результаты массовых расчетов к построению номограмм [77]. При расшифровке сомнительных лет оказывается, что комбинации их с одним, двумя, тремя предшествующими годами и т. д. дают различный процент необеспеченных лет s_n и среди этих процентов всегда имеется свой максимум, как показано в табл. 25.

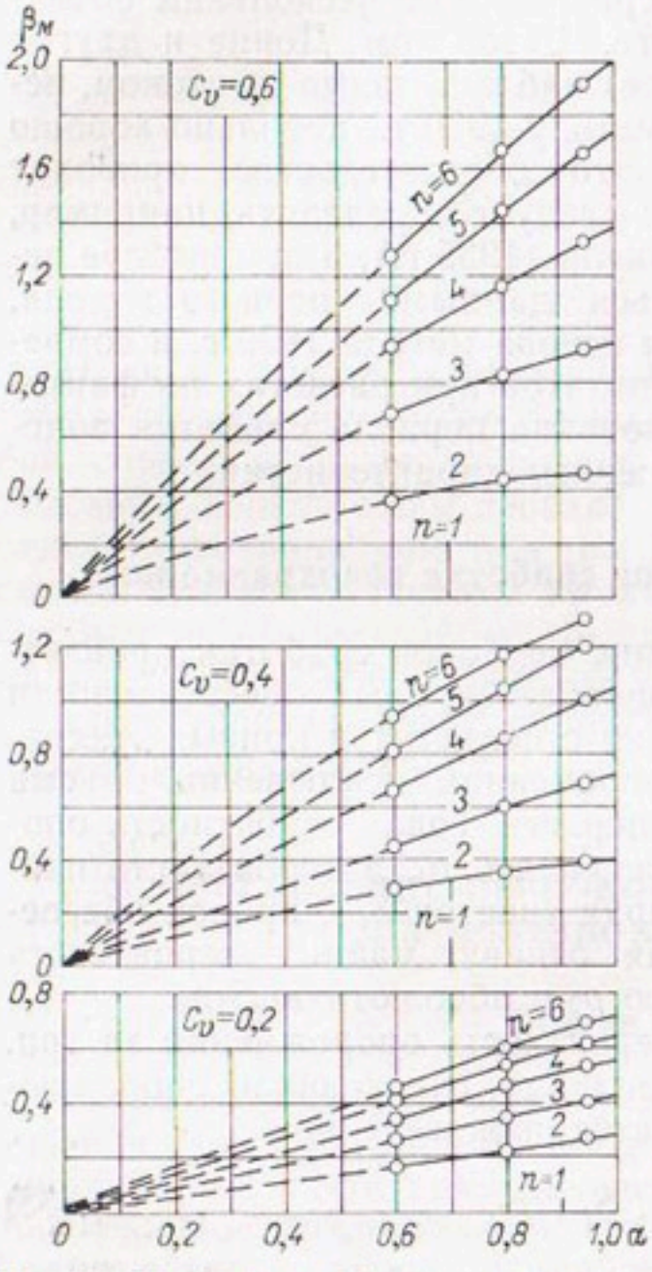


Рис. 53. Графики наиболее вероятных периодов сработки водохранилищ.

В каждом из приведенных в таблице n-летий последний год, заканчивающий опорожнение многолетней составляющей емкости, относится к числу необеспеченных (таким же этот год считается и в работе [61]). В этом примере общее количество необеспеченных лет, вызывающих сработку наполненного водохранилища, равно 2,89%, из них однолетние периоды сработки составляют 0,0%, двухлетние — 0,41%, трехлетние — 0,82% и т. д., причем наиболее частыми, или наиболее вероятными, будут трехлетние периоды сработки объема $\beta_м$ ($s_n = 34{,}65 \cdot 52{,}90 \cdot 4{,}48 = 0{,}82\%$ всего многолетия или $\frac{0{,}82}{2{,}89} \cdot 100 = 28{,}4\%$ всех периодов полной сработки). Подобно этому в каждом расчетном случае существует такая комбинация необеспеченных лет, которая имеет наибольшую вероятность появления по сравнению с другими n-летиями.

Если осредненно учесть приток K к водохранилищу с объемом $\beta_м$ во время его сработки за n лет при водоотдаче α, то, исходя из водного баланса, будем иметь

$$(\alpha - K)\, n = \beta_м,$$

откуда

$$n = \frac{\beta_м}{\alpha - K}.$$

В связи с тем, что величина K бывает разной, период сработки водохранилища может быть различным, что и получается в результате расшифровки сомнительных групп лет.

Если максимум s_n не находится в начале функции $s_n=\varphi(n)$ (случай одногодичного использования емкости $\beta_м$), периоды сработки при $s_n<s_{n\,макс}$ имеют двойные значения и только для $s_{n\,макс}$ получается обычно однозначное решение.

Таким образом, период сработки не является постоянной величиной для данного α и при заданных C_v, C_s и $P\%$. При этом равновероятны два различных значения периода сработки. Например, одинаковую вероятность могут иметь очень короткие и очень длинные и вообще всякие другие равновозможные периоды сработки водохранилища. Но как вероятность, например, различных гидрометеорологических явлений (сток, осадки) обычно бывает наибольшей для обеспеченности около 50% (отклонение от 50% определяется величиной коэффициента асимметрии), вблизи которой обе ветви кривой распределения сливаются, так и двузначные решения для продолжительности периода сработки при наиболее вероятных случаях превращаются в однозначные.

По величине наиболее вероятные периоды сработки тем больше, чем больше α, но они не являются непрерывной функцией от α. Поэтому для неодинаковых значений α возможны одинаковые наиболее вероятные периоды сработки. Так, для $P=97\%$ и $C_v=0{,}50$ различные отдачи α (0,60 и 0,65) характеризуются одинаковыми наиболее вероятными периодами сработки ($T=2$ года + период межени).

С другой стороны, подобно кривой обеспеченности, имеющей слабую изменяемость в зоне наибольшей вероятности ($P\approx50\%$), функция периодов сработки в зоне их наибольшей вероятности $s_{n\,макс}$ также имеет слабую изменяемость, что характерно для высоких α и объясняется переходом функции с ветви меньших периодов на ветвь больших периодов сработки в зоне $s_{n\,макс}$, в которой ближайшие к $s_{n\,макс}$ периоды n мало отличаются по обеспеченности от $s_{n\,макс}$, что характерно и для метода 1930 г.

В связи с этим возможны случаи (в расчетах для высоких α), при которых и $s_{n\,макс}$ дает два или даже три почти одинаково вероятных, но различных по величине периода сработки водохранилища. Например, при $\alpha=0{,}75$ ($C_v=0{,}50$, $P=97\%$) возможны два таких наиболее вероятных периода: 3 года $+t$ и 4 года $+t$ (t — период межени в долях года).

Таким образом, при прочих равных условиях (C_v и $P\%$) возможны неодинаковые наиболее вероятные периоды сработки для одной и той же величины α и одинаковые для различных α. При этом наиболее вероятный период с необеспеченным последним годом равен наиболее вероятному периоду полной сработки без нарушения отдачи, причем последний не является однозначной характеристикой водохранилища. Очевидно, в этом случае можно рассматривать двойные значения продолжительности периода с определенной вероятностью их наступления или наиболее вероятный период сработки водохранилища (рис. 54).

Из данных табл. 25 видно, что одинаковую вероятность появления ($s_n=0{,}4\%$) при заданной обеспеченности отдачи водохранилища

имеют два значения периода сработки многолетней емкости — 2 года и 5 лет. Наибольшую же вероятность появления ($s_{n\ макс}=0{,}82\%$) имеет период $n=3$ года.

В водохозяйственных расчетах представляет интерес именно эта, наиболее вероятная (при данной обеспеченности отдачи водохранилища) длительность сработки объема $\beta_м$, которая исследована автором по методу 1935 г. С целью более полного освещения вопроса о периодах сработки автор произвел расчеты также и по методу 1930 г. для широкого диапазона возможных C_v, α и $P\%$.

Параллельное сопоставление результата расчетов по обоим методам приведено в приложении IV при $C_s=2C_v$ и без учета связи между объемами стока смежных лет. Периоды n многолетней сработки по обоим методам дают хорошее совпадение и только при вы-



Рис. 54. Схема распределения возможных периодов сработки водохранилища.

соких α и больших C_v и P величины n по методу 1930 г. несколько больше, чем по методу 1935 г.

Учитывая, что метод 1935 г. является наиболее совершенным (при расчетах по годовым объемам стока), при выборе периодов n следует ориентироваться на результаты, полученные по этому методу. Эти результаты в приложении IV систематизированы не в виде зависимости $n=\varphi(\alpha, \beta_м)$, как в работе [61], а в виде связи $n=\varphi'(\alpha, C_{vr}, P)$ и для более широкого диапазона коэффициентов α и C_{vr} при шести значениях обеспеченности (в работе [61] приводятся данные по трем значениям C_{vr}, равным 0,20, 0,40, 0,60).

Как и следовало ожидать, периоды опорожнения по исследованиям Крицкого и Менкеля [61] и по данным автора (для метода 1935 г.) полностью совпадают. Поскольку период n лет есть продолжительность сработки лишь многолетней составляющей емкости, то для получения общего периода T сработки всей полезной емкости необходимо добавлять еще продолжительность межени t, в течение которой срабатывается сезонная составляющая емкости.

Таким образом, общий период сработки водохранилища при многолетнем регулировании $T=n+t$ лет.

Определение расчетного притока в водохранилище, его полезной отдачи и сбросов

Среднегодовой приток за период сработки многолетней составляющей емкости $\beta_м$ изолированного водохранилища связан с продолжительностью периода n и может быть определен по формуле

$$K = \alpha - \frac{\beta_м}{n}.$$

Приток в дополнительный год, в течение которого срабатывается сезонная составляющая емкости, определяется на основании положений, изложенных в § 12.

Можно считать целесообразным установление осредненного годового притока K' для всего периода T полного использования рабочей емкости водохранилища. При этом

$$K' = \frac{(n+t)\,\alpha - (\beta_м + \beta_с)}{n+m},$$

где t — продолжительность низкого стока (в долях года) от начала межени до момента наибольшей в году сработки водохранилища; m — средний объем низкого стока (в долях среднего годового), соответствующий периоду t.

Определение среднегодового притока за период сработки необходимо при расчете полезной отдачи, солевого режима водохранилища и т. п. Для приближенной оценки полезной отдачи водохранилища при разных коэффициентах регулирования часто получают ее вычитанием из отдачи брутто годовых потерь на испарение и фильтрацию, определяемых суммарно за год в периоде сработки по некоторому объему $V_{расч}$ и соответствующей ему площади водохранилища. Этот объем (и соответствующая ему площадь), дающий годовые потери, равные осредненным потерям за год при сработке всего водоема от НПГ до ГМО за период $T = n$ лет + период межени, примерно будет

$$V_{расч} = aV_п + V_{м.о}.$$

Коэффициент a для периода сработки обычно равен 0,5—0,6, т. е. не вполне устойчив. Он зависит от конфигурации водохранилища, продолжительности и режима его сработки, а значит, и от коэффициента регулирования. Поэтому суммарный учет потерь за год (табл. 29) применим лишь в приближенных массовых расчетах потерь $\sum q$ и полезной отдачи за год $A_п = A_{бр} - \sum q$, где $A_{бр} = \alpha\Gamma_0$. Отдачу $A_п$ можно найти и по соотношению $A_п = rA_{бр}$, где r — коэффициент, определяемый так же, как и a, по одному из табличных расчетов полезной отдачи. Обычно, например, в условиях Украины и при средних потерях на фильтрацию $r = 0{,}65 \div 0{,}75$.

Для более надежного учета приращения полезной отдачи при разных α, а также для определения окончательной полезной отдачи по принятому α требуются табличные расчеты для периода сработки T, изменяющегося в зависимости от α.

Кроме того, при выявлении приращений полезной отдачи следует иметь в виду, что для некоторых α может потребоваться расчет по двум смежным периодам сработки (например, для двух лет плюс период межени и трех лет плюс период межени); окончательно выбирают более приемлемый результат. Такая же необходимость может возникнуть и для гидрохимических расчетов [85 и др.] и при решении других вопросов водного хозяйства, связанных с продолжительностью сработки и величиной расчетного притока.

Потребность выбора из расчетов для двух смежных периодов может возникнуть в связи с тем, что, согласно изложенному, в некоторых случаях для одного и того же α две различные продолжительности сработки имеют вероятность, практически одинаковую с наибольшей вероятностью периода опорожнения. Но продолжительность сработки и связанный с ней расчетный приток за этот период, как отмечено выше, оказывают некоторое влияние на величину полезной отдачи, хотя и малосущественное.

Полезная отдача $A_п$ растет с увеличением коэффициента регулирования α. Ее приращения следуют за изменением α более или менее равномерно и закономерно (например, приращения могут затухать с повышением α). При любых условиях регулирования часть зарегулированной отдачи, идущая на потери, повышается с увеличением:

а) коэффициента изменчивости годового стока (в связи с чем растет объем водохранилища при постоянном ГМО);

б) нормы потерь;

в) удельной площади зеркала (приходящейся на единицу полного объема водохранилища).

Продолжительность периода сработки T очень мало влияет на величину полезной отдачи при постоянной высоте слоя потерь на испарение. Если, например, наиболее вероятный период сра-

Определение полезной отдачи водохранили

Параметры годового стока: $Г_0=41{,}4$ млн. м³/год; $C_{вг}=0{,}50$; $C_{зг}=2C_{вг}$; $m=0{,}40$.

(ГМО)

Коэффициент регулирования α	Многолетний объем $V_м$ млн. м³	Сезонный объем $V_с$ млн. м³	Полезный объем $V_п$ млн. м³	ГМО = 83,5 м, общий объем V_0 млн. м³	НПГ, м	площадь зеркала при НПГ F км²
0,50	9,60	9,00	18,6	54,6	85,1	12,7
0,55	12,8	9,82	22,6	58,6	85,4	13,2
0,60	16,8	10,8	27,6	63,6	85,7	13,8
0,65	22,0	11,7	33,7	69,7	86,0	14,4

ботки составляет 4 года, то годовая полезная отдача при одной и той же высоте испарения будет практически почти постоянной по периодам в 3, 4 или 5 лет. Это явление, кажущееся на первый взгляд странным, объясняется тем, что изменение продолжительности сработки связывается с изменением расчетного притока. Некоторое влияние периода сработки на полезную отдачу проявляется лишь в том, что:

а) ход объемов и площадей во времени при разных периодах различен;

б) слой потерь на испарение с увеличением периода T уменьшается, так как при этом коэффициент изменчивости испарения с водной поверхности за период T лет падает пропорционально $\sqrt{T}$ (здесь T — дается в целых годах). Для достаточно продолжительных периодов (4, 5 и 6 лет) потери на испарение принимаются средними. Понятно, что периоды, сравниваемые в отношении влияния их на полезную отдачу, должны быть достаточно вероятными сроками сработки водохранилища. Нельзя, например, для водохранилища с наиболее вероятным сроком опорожнения в один год плюс период межени сравнивать отдачу при сработке в один год с максимальным испарением и в пятилетний период со средней нормой потерь на испарение. Результаты в таком случае были бы несравнимыми.

Определение обеспеченной полезной отдачи производится или по фактическому стоку за расчетный период из имеющихся гидрометрических наблюдений, в течение которого водохранилище срабатывается от НПГ до ГМО, или по стоку и периоду, определение которых изложено выше.

Пример расчета обеспеченной полезной отдачи приведен в табл. 30 при следующих данных: коэффициент регулирования $\alpha=0{,}62$; среднегодовой сток $\Gamma_0=18{,}2$ млн. м³/год; средняя доля

Таблица 29

ща с учетом суммарных потерь за год

Обеспеченность отдачи водохранилища $P=97\%$. Горизонт мертвого объема задан

$F_{ГМО}=9{,}7$ км², $V_{м.\,о}=36{,}0$ млн. м³

$0{,}6V_п$ млн. м³	расчетный объем $V_{расч}$ млн. м³	расчетная площадь $F_{расч}$ км²	годовое испарение $V_и$ млн. м³	годовая фильтрация (12%) $V_ф$ млн. м³	потери за год, млн. м³	отдача брутто $A_{бр}$ млн. м³ / год	полезная отдача $A_п$ млн. м³ / год
11,2	47,2	11,7	7,00	5,66	12,66	20,7	8,04
13,6	49,6	12,1	7,08	5,95	13,03	22,8	9,77
16,6	52,6	12,4	7,25	6,31	13,56	24,8	11,24
20,2	56,2	12,9	7,55	6,75	14,30	26,9	12,60

Расчет полезной

Испарение 585 мм/год;

Сезон года	Естественный сток, 10^6 м³	Полезное потребление и потери, 10^6 м³	Объем водохранилища к концу сезона, 10^6 м³
1	2	3	4
			Прибли
			20,51
Лето 1-е (V—VI)	0,96	1,88	19,59
Лето 2-е (VII—IX)	0,64	2,82	17,41
Осень (X—XI)	0,48	1,88	16,01
Зима (XII—II)	1,12	2,82	14,31
Весна (III—IV)	4,78	1,88	17,21
	За год $\sum = 7,98$	11,28	
Лето 1-е (V—VI)	0,96	1,88	16,29
Лето 2-е (VII—IX)	0,64	2,82	14,11
Осень (X—XI)	0,48	1,88	12,71
Зима (XII—II)	1,12	2,82	11,01
Весна (III—IV)	4,78	1,88	13,91
	За год $\sum = 7,98$	11,28	
Лето 1-е (V—VI)	0,96	1,88	12,99
Лето 2-е (VII—IX)	0,64	2,82	10,81
Осень (X—XI)	0,48	1,88	9,41
Зима (XII—II)	1,12	2,82	7,71
Всего	19,16	31,96	

$$A_{\text{п}} = \frac{31,96 - 12,2}{34} = \frac{19,76}{34} =$$

Прибли

			20,51
Лето 1-е (V—VI)	0,96	1,16 + 1,13	19,18
Лето 2-е (VII—IX)	0,64	1,74 + 2,24	15,84
Осень (X—XI)	0,48	1,16 + 0,59	14,57
Зима (XII—II)	1,12	1,74 + 0,57	13,38
Весна (III—IV)	4,78	1,16 + 0,51	16,49
	За год $\sum = 7,98$		

(Расчеты для второ

Лето 1-е (V—VI)	0,96	1,16 + 0,79	12,35
Лето 2-е (VII—IX)	0,64	1,74 + 1,52	9,73
Осень (X—XI)	0,48	1,16 + 0,36	8,69
Зима (XII—II)	1,12	1,74 + 0,32	7,75

$$A_{\text{п}} = \frac{31,96 - 11,44}{34} =$$

Таблица 30

отдачи водохранилища

фильтрация 1,25% в месяц

Средний объем, 10^6 м³	Средняя площадь, км²	Потери, 10^6 м³			
		на фильтрацию	на испарение	сумма	нарастающая сумма
5	6	7	8	9	10
жение I					
20,05	4,55	0,51	0,62	1,13	1,13
18,50	4,20	0,69	1,55	2,24	3,37
16,71	3,83	0,42	0,17	0,59	3,96
15,16	3,55	0,57	—	0,57	4,53
15,76	3,67	0,39	0,12	0,51	5,04
16,75	3,85	0,42	0,53	0,95	5,99
15,20	3,57	0,57	1,32	1,89	7,88
13,41	3,22	0,34	0,14	0,48	8,36
11,86	2,88	0,44	—	0,44	8,80
12,46	2,95	0,31	0,10	0,41	9,21
13,45	3,25	0,34	0,45	0,79	10,0
11,90	2,90	0,45	1,07	1,52	11,52
10,11	2,45	0,25	0,11	0,36	11,88
8,56	2,18	0,32	—	0,32	12,20

$0{,}58 \cdot 10^6$ м³/мес. $= 6{,}96 \cdot 10^6$ м³/год

жение II

19,84	4,50	0,48	0,62	1,10	1,10
17,51	4,02	0,66	1,48	2,14	3,24
15,20	3,57	0,38	0,16	0,54	3,78
13,98	3,35	0,52	—	0,52	4,30
14,94	3,52	0,37	0,12	0,49	4,79

го года не показаны)

12,84	3,15	0,32	0,43	0,75	9,40
11,04	2,70	0,41	0,99	1,40	10,80
9,21	2,23	0,23	0,10	0,33	11,13
8,22	2,10	0,31	—	0,31	11,44

$0{,}603 \cdot 10^6$ м³/мес. $= 7{,}24 \cdot 10^6$ м³/год

меженного стока в годовом $m=0{,}40$; коэффициенты вариации и асимметрии $C_v=0{,}50$, $C_s=2C_v$; обеспеченность отдачи водохранилища $P=97\%$; общий объем водохранилища равен $20{,}51\cdot10^6$ м^3, полезный — $12{,}79\cdot10^6$ м^3.

По приложению IV, период сработки многолетней составляющей емкости водохранилища $n=2$ годам. С учетом длительности сработки сезонной составляющей емкости ($t=10$ месяцев $=0{,}833$ года) общая расчетная продолжительность сработки будет $T=2$ годам 10 месяцам (или 2,833 года).

Приток в маловодный год равен

$$\Gamma_i=\frac{(n+t)\,\alpha\Gamma_0-V_{\text{п}}}{n+m}=\frac{2{,}833\cdot0{,}62\cdot18{,}2-12{,}79}{2{,}40}=7{,}98\cdot10^6\ \text{м}^3/\text{год}.$$

Этот приток распределяется по сезонам года. Поскольку ход объемов водохранилища по сезонам неизвестен, так как неизвестны потери, расчет производится обычно в двух приближениях. Отдача брутто $\alpha\Gamma_0=11{,}28\cdot10^6$ м^3/год распределяется по сезонам года пропорционально числу месяцев (при равномерном водопотреблении). Начиная с полного объема $V_0=20{,}51\cdot10^6$ м^3, конечные объемы (к концу каждого сезона) определяются по балансу: начальный объем плюс естественный сток минус отдача. Затем подсчитываются средние за каждый сезон объемы и находятся соответствующие им площади (по кривым объемов и площадей).

Для средних объемов и площадей вычисляются потери на фильтрацию и испарение, которые суммируются по сезонам, а также в нарастающем порядке за весь период сработки. В конце этого периода должен оставаться мертвый объем. Поэтому во избежание ошибок данные граф 2, 3 и 4 табл. 30 следует сбалансировать сразу же для всего периода.

Полезная отдача за месяц в приближении I получается, если из суммарной отдачи брутто за период вычесть суммарные потери и остаток разделить на число месяцев периода. Но поскольку потери определялись по завышенным объемам и площадям (без учета потерь), то и потери из этого расчета оказываются завышенными, а значит, полезная отдача — заниженной. Поэтому для уточнения снова выполняется расчет (табл. 30, приближение II), причем полезная отдача и потери учитываются по приближению I.

Окончательная полезная отдача за месяц будет равна суммарной отдаче брутто за период (за вычетом уточненных суммарных потерь), деленной на число месяцев периода. В данном примере полезная отдача равна $0{,}603\cdot10^6$ м^3/мес., или $7{,}24\cdot10^6$ м^3/год.

На рис. 55 дан пример кривых связи полезной отдачи с параметрами водохранилища: общим объемом, отметкой НПГ и площадью зеркала при НПГ. В некоторых случаях (при отсутствии гидрометрического ряда) необходимо определить при многолетнем

регулировании среднюю за многолетие возможную отдачу водохранилища. Эту отдачу можно было бы определить по среднему году. Однако если начало этого года приурочить к ГМО, то вследствие минимального объема и площади зеркала полезная отдача в средний год будет наибольшей. Если начало того же среднего года будет приурочено к отметке, соответствующей сумме многолетнего и мертвого объемов (без сезонной емкости, поскольку на-

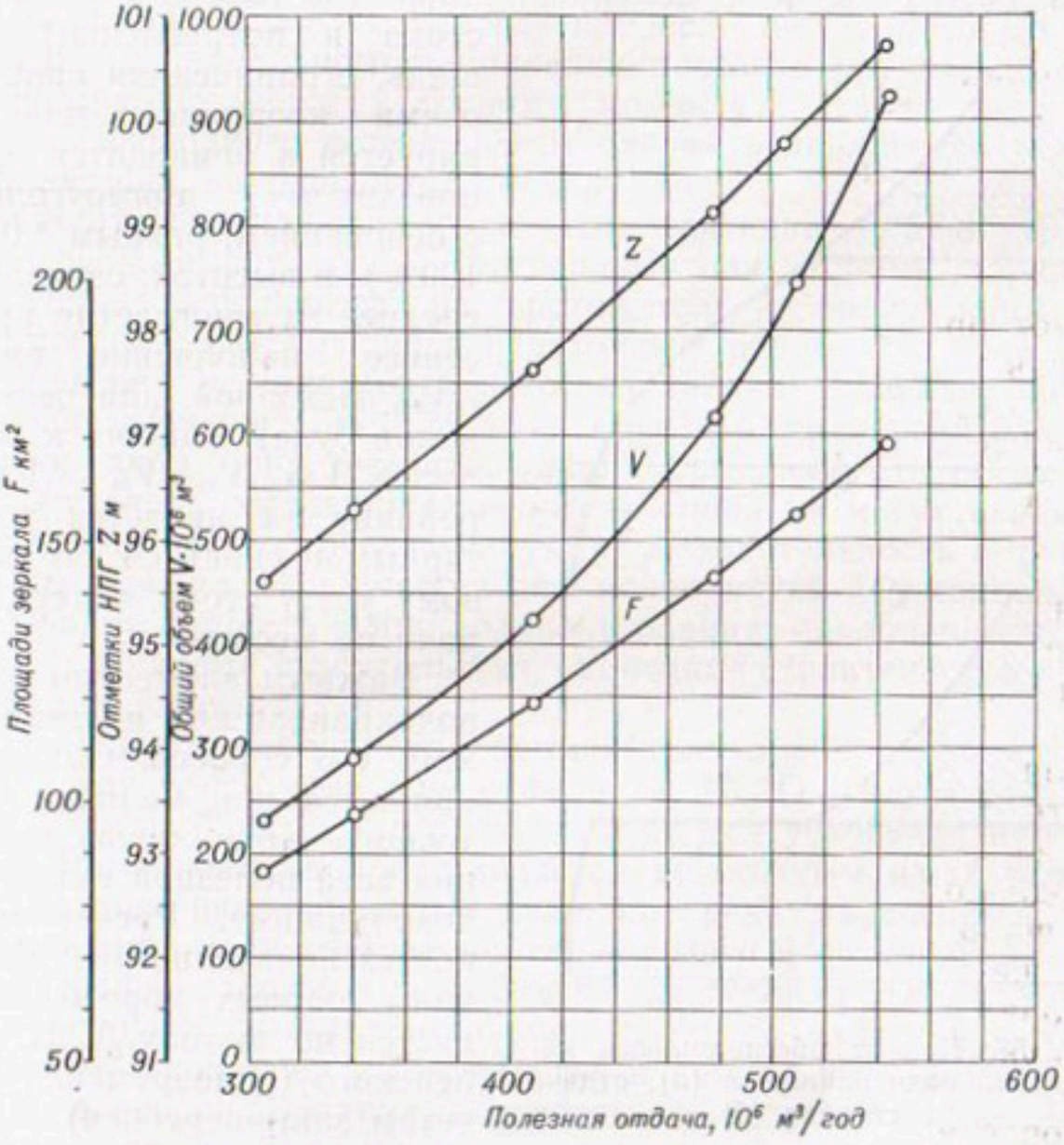


Рис. 55. Кривые зависимости основных параметров водохранилища от его полезной отдачи.

чало года в этом случае мы относим к началу весны), то полезная отдача за средний год будет наименьшей.

Так можно получить крайние пределы изменения истинных значений средней полезной отдачи в зависимости от наполнения водохранилища к началу весны среднего года. Как видно, при многолетнем регулировании и отсутствии гидрометрического ряда для получения среднемноголетней отдачи (по водности) необходимо не только регулирование среднего года (или некоторой группы лет

со средним стоком, близким к норме стока), но также нужно найти среднюю за многолетие начальную отметку водохранилища. Привязав к ней начало года (или группы лет) и выполнив регулирование стока с окончанием регулирования на исходной отметке, получаем среднюю по водности отдачу за многолетие.

Определение упомянутой начальной отметки производится на основе построения кривой обеспеченности наполнений многолетней составляющей емкости водохранилища (по годовым величинам стока и потребления). Площадь, ограниченная кривой и осями координат, планиметрируется и приводится к равновеликому прямоугольнику с основанием, равным 1,0 (или 100%), и высотой, означающей среднее за многолетие предвесеннее наполнение емкости $_{ср}V_{м}$. Исходной для регулирования будет емкость к началу весны $V = {}_{ср}V_{м} + V_{м.о}$. Регулирование же является элементарным и сводится к балансовому учету стока, потерь и отдачи по месяцам.

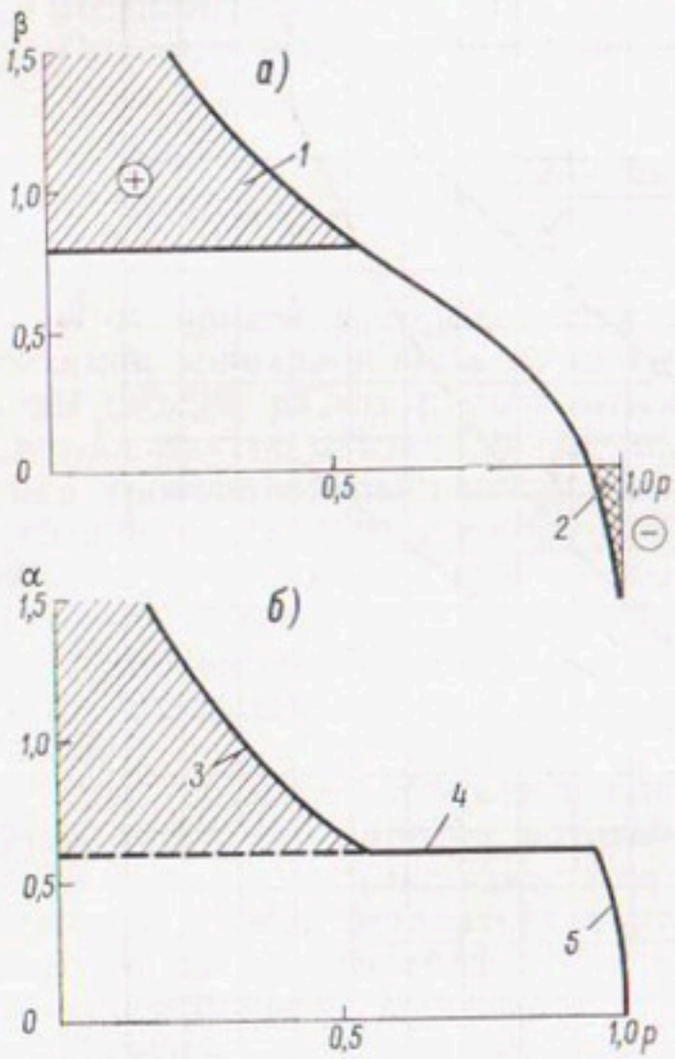


Рис. 56. Кривые обеспеченности наполнений водохранилища (*а*), отдачи и сбросов (*б*).

1 — избытки воды, *2* — дефицит, *3* — сбросы, *4* — гарантированная отдача, *5* — перебойная отдача.

Важным элементом работы водохранилища является режим его сбросов. Сбросы появляются при наличии избыточного стока после заполнения всей полезной емкости водохранилища. Расчет вероятностей появления разной величины годовых сбросов выполняется по методу А. Д. Саваренского (одновременно с расчетом зоны перебоев).

Форма расчетов применяется с построениями по фазам стока или по годовым величинам стока, как показано на рис. 56. Для этого нужно суммировать кривую обеспеченности наполнений многолетней составляющей емкости $V_{м} = \varphi(P)$ и кривую обеспеченности годового стока, исключив годовую отдачу также и в зоне избытков, как бы переполняя водохранилище на участке *1* (рис. 56 *а*). Этот участок переносится затем на кривую гарантированной отдачи как добавление к ней избытков воды при соответствующих обеспеченностях. Полученный участок *3* (рис. 56 *б*) характеризует работу установки в зоне избытков стока.

§ 15. ХАРАКТЕРИСТИКА НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ РАБОТЫ ВОДОХРАНИЛИЩА (ПЕРИОДЫ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО НАПОЛНЕНИЯ И ПЕРЕБОЕВ)

Первоначальное наполнение водохранилища

Расчетная отдача становится обеспеченной, если водохранилище в прошлом хотя бы однажды было наполнено до НПГ и перешло к установившемуся режиму или если оно в пределах года независимо от начального наполнения достигло уровня, до которого оно срабатывается к данному моменту в первом году расчетного маловодного n-летия. Этот случай эквивалентен режиму водохранилища, наполненного к началу года.

С момента окончания строительства или какой-нибудь его очереди до первого заполнения (по первому или второму варианту) проходит пусковой период, на протяжении которого водохранилище имеет неустановившийся переходный режим. Но пока водохранилище не получило первичного заполнения, возникает потребность либо уменьшить отдачу, т. е. понизить производительность установки, либо допустить снижение обеспеченности ее работы. Поскольку вновь создаваемые водохранилища не могут вводиться в действие на полную обеспеченную производительность в течение пускового периода, выполняется ряд мероприятий для сокращения этого периода (упорядочение водопользования, накопление меженного стока во время строительства, окончание строительства в срок до начала половодья и т. п.).

Подробно эти мероприятия применительно к водохранилищам тепловых электростанций освещены в гл. IX. Однако в большинстве случаев полностью задерживать сток для ускорения наполнения водохранилища не представляется возможным из-за условий водоснабжения расположенных ниже по реке населенных пунктов, требований водного транспорта, бытового и оросительного водопользования колхозов и т. п. Водохозяйственная же установка, пусть с неполной производительностью, всегда вводится в действие сразу по окончании строительства и даже в ходе его, так как длительное неиспользование построенного гидроузла (как источника воды или энергии) означает омертвление капиталовложений и является нежелательным. По этим причинам на наполнение водохранилища остается только часть стока, в связи с чем пусковой период может быть длительным, особенно при значительном регулировании стока.

Таким образом, выбор режима водохозяйственной установки в пусковой период представляет особую задачу, решение которой достигается построением кривых обеспеченности наполнений водохранилища для серии последовательных лет от начала пуска. За начальное принимается пустое водохранилище (или наполненное до ГМО, если к окончанию строительства такое наполнение будет обеспечено). Расчет обычно ведется по годовым интервалам времени и при постоянном типовом распределении стока на две

фазы — весну и межень (т. е. при условии $C_{vв}=C_{vм}=C_{vг}$). При этом вероятности наполнений представляются по одной кривой к концу каждого года после окончания строительства (к концу первого года, второго и т. д.). Но расчет легко выполняется и при условии непостоянного распределения стока внутри года ($C_{vв}\neq C_{vм}$), причем сток каждой фазы характеризуется своей кривой обеспеченности, а вероятности наполнений могут быть представлены двумя кривыми для каждого последующего года от начала пуска (для конца весны и конца межени).

Для малых водохранилищ более желательны построения по фазам стока. Процесс расчета заключается в последовательном суммировании кривых обеспеченности наполнений с кривыми обеспеченности стока, уменьшенного на величину потребления, потерь и холостых сбросов (см. § 11 и 13).

Кривые обеспеченности наполнений к концу первого, второго и третьего года от начала работы водохранилища показаны на рис. 49 для следующих параметров регулирования: $\alpha_{97}=0{,}62$, $\beta_{н}=0{,}702$, $C_{vг}=0{,}55$, $C_{sг}=2C_{vг}$, $m=0{,}40$ при равномерном водопотреблении. К моменту пуска водохранилище считается наполненным до ГМО. Наполнения к концу первого года наносятся непосредственно по рис. 47 *в*, с которого снимаются значения $\beta_{к}$ и P при $\beta_{н}=0$. Затем эта кривая разбивается на ступени. Координаты кривой к концу второго года определяются при помощи той же номограммы с одновременными вычислениями, аналогичными приведенным в табл. 27. Разбивая вторую кривую на ступени, переходим к наполнениям в конце третьего года и т. д. Расчет доводится до того года, когда вероятности наполнений стабилизуются. Соответствующая этому году безусловная кривая характеризует стационарный режим водохранилища.

Упомянутые условные кривые наполнений в пусковой период водохранилища могут быть построены при водопотреблении, постоянном для всех лет этого периода или при различном в зависимости от того, какое фактическое наполнение будет к концу первого, второго и т. д. года. В проектных условиях этого знать нельзя, поэтому и приходится учитывать водопотребление, постоянное для пускового периода, или же представлять возможные его варианты по годам, предполагая некоторые конкретные наполнения к концу первого, второго и т. д. года.

При реальных условиях непосредственно в процессе пуска водохранилища водопотребление принимается и кривые наполнений для последующих лет строятся, исходя из наличного наполнения к каждому данному году. Правила расходования воды должны предусматривать постепенное приближение отдачи водохранилища от некоторой ее доли до полной величины по мере наполнения водохранилища. При пустом водохранилище расход отводимой из него воды не должен превышать естественный минимальный расход реки (или же должен быть еще меньше, насколько это возможно по местным условиям). Отметим, что на пусковой период в связи с его специфическими условиями приходится наибольшая

вероятность перебоев в работе водохранилища, если его отдача не уменьшается по сравнению с проектной. В некоторых случаях в этот период выдерживается полная отдача, но допускается снижение ее обеспеченности.

Упомянутые кривые обеспеченности наполнений и производные от них кривые обеспеченности отметок уровня и площадей водохранилища, как и кривые обеспеченности отдачи для некоторых конкретных наполнений, являются искомыми характеристиками режима водохранилища для пускового периода его работы. Эти характеристики одновременно дают оценку условий выхода установки на нормальную работу после перебойного периода. Однако такая оценка возможна в случаях, если рассмотренные кривые построены с учетом заполненного к началу пуска мертвого объема или если его величина незначительна. Важное значение при этом имеет также и то, в какой мере будет отличаться схема нового наполнения после перебойного периода, который может наступить через весьма длительное время после пуска установки.

Условия работы водохранилища за пределами расчетной обеспеченности

При обеспечении водой предприятий, населенных пунктов и других водопользователей следует учитывать различие в условиях водоснабжения за пределами расчетной обеспеченности в случаях:

а) подачи воды непосредственно из водотока, ориентируясь на его расчетный минимальный расход (если он достаточен);

б) регулирования стока, когда минимальные расходы реки недостаточны для заданного водопотребления.

Если норматив обеспеченности P высок (например, $P=97\%$), то в первом случае за его пределами может наблюдаться сравнительно небольшое снижение минимальных расходов по сравнению с расчетным расходом Q_{97}. Такое снижение обычно может происходить лишь на 20—30%, если иметь в виду кратковременные (одно- и двухсуточные) минимумы за весьма длительный период наблюдений (более 50 лет). Даже если представить снижение минимума на 50% по сравнению с расчетным, то и в этом случае будет наблюдаться лишь соответствующее ограничение производительности установки.

Все происходит иначе в случае регулирования стока. При исчерпании всей рабочей емкости водохранилища, т. е. при наступлении перебоя за пределами расчетной обеспеченности, водоснабжение вынуждено будет переходить от гарантированных расходов из водохранилища к естественно бытовым расходам реки, которые на малых реках равны или близки к нулю (последнее обстоятельство и заставляет на таких реках прибегать к регулированию стока). При этом дефицит воды ощущается тем более резко, чем выше обеспеченная зарегулированная отдача, особенно по малым рекам. Важно отметить и то, что при регулировании стока малых рек для некоторых предприятий, снабжаемых водой с весьма высокой

обеспеченностью, трудно наметить заблаговременно постепенное снижение безвозвратного забора воды во избежание полной остановки предприятия.

Гидрологические особенности малых водотоков не дают уверенности в необходимости снижения производства в предположении надвигающегося перебоя. Малые бассейны практически пересыхающих рек отличаются большой неустойчивостью стока и существенными отклонениями гидрометеорологических факторов от общего фона их для значительных бассейнов, по которым Гидрометслужба выдает соответствующие информации.

Так, на малых реках снегозапасов бывает меньше, чем на значительных бассейнах в целом, и наоборот. То же относится и к дождевым осадкам, грунтовому питанию, условиям агролесомелиорации и т. п. Кроме того, по малым рекам обычно не имеется длительных наблюдений за стоком. При этом эксплуатационное регулирование стока малых рек может быть связано со следующими обстоятельствами:

1) невозможность обоснования перехода при многолетнем регулировании к постепенному уменьшению забора воды и соответствующему уменьшению мощности предприятия;

2) невозможность заблаговременного надежного прогноза сезонных объектов стока в малом бассейне.

Технические условия работы некоторых весьма ответственных водопотребителей (например, мощных базисных электростанций) и гидрологические особенности малых рек могут привести к остановке предприятия на значительную или сравнительно короткую часть года (в зависимости от величины дефицита воды). Мероприятия для уменьшения числа перебоев и смягчения их изложены в гл. VII. Чтобы полнее представить себе режим работы любой водохозяйственной установки (в том числе и ГРЭС) на зарегулированном стоке, остановимся на характеристике перебоев.

Сущность перебоев и перебойных периодов

За пределами расчетной обеспеченности отдачи $P\%$ в связи с исчерпанием запасов воды наступает перебой, т. е. ограничение подачи воды потребителям в течение некоторой части года. Такие ограничения различаются по глубине и длительности.

При годовом, или сезонном, регулировании величина перебойной отдачи (за пределами расчетного значения $P\%$) устанавливается на основе кривой обеспеченности годового или меженного стока, так как работа водохранилища замыкается в пределах каждого года и на смежные годы не влияет.

Перебои при многолетнем регулировании стока — сложное явление в жизни водохранилища. Особенности их освещаются ниже.

Согласно исследованиям [61], большинство перебоев из возможного их числа, равного, например, 5% от числа лет при $P=$

$=95\%$, относится к одиночным годам — одноразовые перебои.[1] При этом более или менее существенный недостаток воды распространяется на некоторую часть одного года. Но с повышением отдачи α повышается вероятность повторения перебоя в смежном году. При высоких α почти две трети перебойных лет наступает не поодиночке, а по два и более подряд. В режиме водохранилищ с большой отдачей α длительные периоды нормальной работы сменяются группами лет с ограниченной отдачей.

Глубина перебоя (т. е. количество недоданной потребителям воды или дефицит в нормальной отдаче) бывает различной по перебойным годам и изменяется от нуля до величины, близкой в пределе к годовой отдаче брутто.

Из общего количества перебоев значительная часть их имеет небольшие дефициты и лишь очень ограниченное число случаев бывает с большими дефицитами, достигающими 50% отдачи и более. Но поскольку общее число перебойных лет для всей продолжительности работы установки невелико, например 5 из 100 ($P=95\%$), то случаи с большими дефицитами — явление крайне редкое. Это свидетельствует о высокой надежности работы установки при обеспеченности 95% и выше.

Режим работы установки в перебойной зоне выявляется из построения кривой обеспеченности наполнений $V_м=\varphi(P)$. Кривую *2* зоны дефицитов отдачи (рис. 56 *а*) можно получить путем однократного сложения безусловной кривой $V_м=\varphi(P)$ с кривой обеспеченности годового стока за вычетом годовой отдачи. При этом сложение надо производить и в дефицитной зоне, ниже нуля. Отрицательные ординаты кривой $V_м=\varphi(P)$ показывают абсолютные величины дефицитов (глубины перебоев). Уменьшая затем на эти дефициты (при соответствующих $P\%$) гарантированную отдачу, получаем ее величины в перебойной зоне (участок *5*, рис. 56 *б*).

В. А. Бахтиаров [12] предлагает упрощенное построение участка *5* (зоны перебоев). Часть кривой обеспеченности годового стока с ординатами $K\leqslant\alpha$ и с абсциссами от P_α до 1 приводится к зоне перебоев в пределах от P до 1. Для этого абсциссы указанной части кривой пересчитываются по соотношению

$$P_i=P+\frac{1-P}{n}\,i,$$

где P — обеспеченность бесперебойной отдачи; n — число равных отрезков, на которые делится участок оси x в пределах от P_α до 1 ($n=4\div5$); i — номер ординаты кривой обеспеченности стока в местах деления ($i=0$ при обеспеченности P_α, $i=n$ в конце кривой); P_i — обеспеченность i-той ординаты перебойного участка, равной i-той ординате кривой обеспеченности стока.

Дефициты отдачи равны разности $\alpha-K$, где K — ординаты перебойного участка кривой *5*.

---

[1] Не следует забывать разницы между длительностью перебоя в маловодном периоде и длительностью самого периода маловодья и сработки водохранилища, который может объединять несколько маловодных лет.

Известна следующая зависимость вероятности перебоя ρ для года, входящего в группу из n перебойных лет (если общее число перебойных лет принять за единицу):

$$\rho = n(1-c)^2 c^{n-1},$$

где c — вероятность наступления года со стоком $K \leqslant \alpha$ после исчерпания емкости водохранилища.

Величина c определяется по таблицам С. И. Рыбкина. Так, для $K=\alpha=0{,}70$, $C_v=0{,}50$ и $C_s=2C_v$ обеспеченность стока $K=\alpha$ равна $P_K=69\%$ (или 0,69), а потому $c=100-P_K=31\%$ (или 0,31).

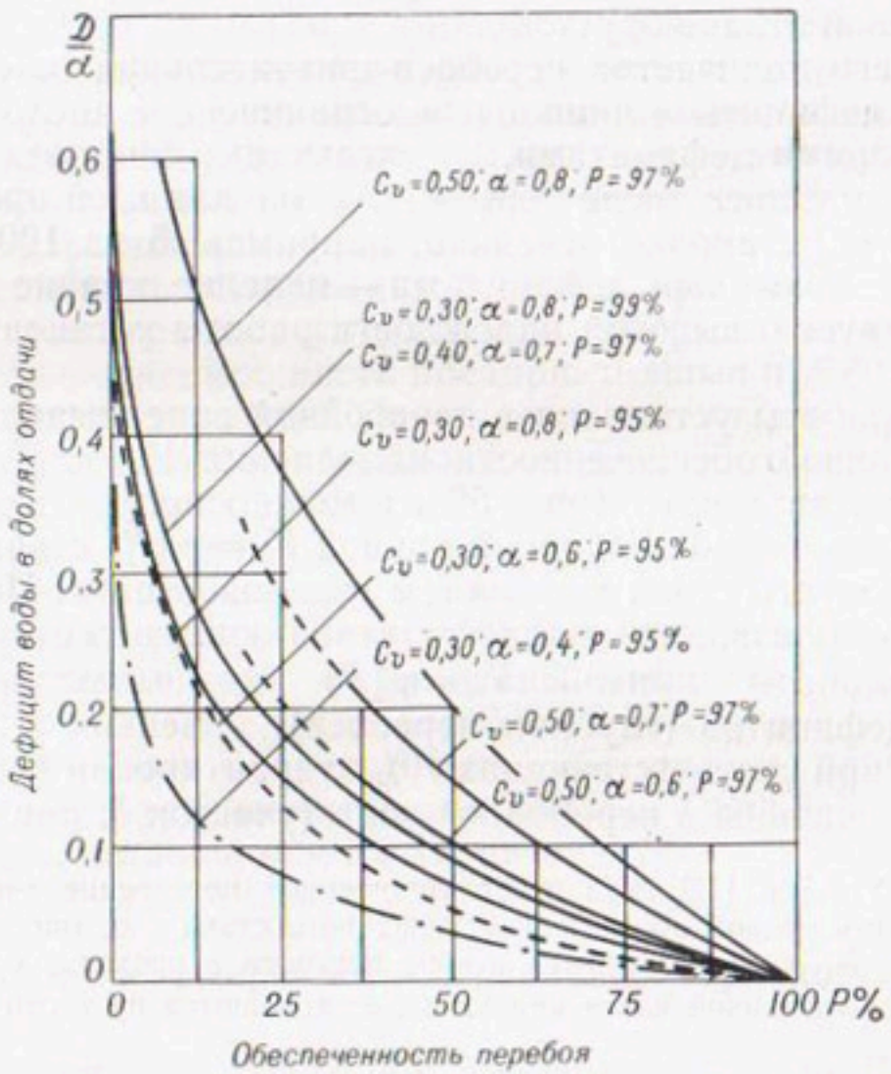


Рис. 57. Кривые обеспеченности дефицитов воды (в долях отдачи).

Остановимся на характеристике величин дефицитов отдачи.

Если число перебойных лет, находящихся за пределами обеспеченности P (т. е. число перебоев в пределах $100-P\%$ лет), принять за 100%, то обеспеченность тех или иных дефицитов отдачи можно представить в виде кривых (рис. 57). Кривые обеспеченности дефицитов показывают следующее:

а) чем меньше обеспеченность дефицита, тем он значительнее по величине;

б) дефицит в отдаче возрастает с повышением отдачи α и ее обеспеченности $P\%$. Так, при $\alpha=0{,}40$ и $P=95\%$ среднегодовой

дефицит в отдаче для всех перебойных лет зоны $100-P\%$ составляет 6—7%, а при $\alpha=0{,}80$ и $P=99\%$ дефицит равен 13%.

Резкое возрастание дефицитов с уменьшением обеспеченности перебоев объясняется интенсивным уменьшением объемов стока при высоких его обеспеченностях. По упомянутым кривым, заимствованным из работ [61] и [25] и дополненным расчетами по графикам А. Д. Саваренского [107], получены приведенные в табл. 31 величины обеспеченности дефицитов отдачи в годы из числа перебойных лет (в долях отдачи брутто).

Таблица 31

Дефициты отдачи в перебойные годы (в долях отдачи брутто)

№ п/п	Характеристика стока и регулирования			Обеспеченность годового перебоя ρ (из числа перебойных лет), %					
	C_v	α	$P\%$	5	10	20	25	35	50
1	0,50	0,8	97	0,61	0,52	0,40	0,36	0,30	0,20
2	0,50	0,7	97	—	—	0,32	0,28	0,22	0,15
3	0,50	0,6	97	—	—	0,25	0,21	0,17	0,11
4	0,30	0,8	99	0,39	0,30	0,21	0,18	0,15	0,09
5	0,40	0,7	97	0,39	0,30	0,21	0,18	0,15	0,09
6	0,30	0,8	95	0,33	0,25	0,18	0,15	0,12	0,07
7	0,30	0,6	95	0,32	0,24	0,16	0,13	0,10	0,05
8	0,30	0,4	95	0,19	0,13	0,10	0,08	0,07	0,04

Примечание. Величины ρ в строках 4 и 5 имеют одинаковые значения, а на рис. 57 соответствующие кривые практически совпадают, и потому заменены одной общей кривой.

При $C_v=0{,}50$, $\alpha=0{,}7$ и $P=97\%$ дефицит отдачи с обеспеченностью годового перебоя $\rho=20\%$ по табл. 31 равен 0,32 (или 32% отдачи брутто; при этом 80% числа перебоев имеют меньшую величину дефицита, а 20% — большую). При отдаче брутто, равной $10\cdot10^6$ м³/год, дефицит в данном случае равен $D=3{,}2\cdot10^6$ м³ и продолжается приблизительно в течение $\frac{D}{A_{бр}}\cdot365=117$ суток.

На рис. 57 площадь между кривой дефицитов и осями координат означает суммарный объем дефицитов (в долях от α) за все многолетие, принятое за 100%. При одних и тех же C_v и $P\%$ эти площади не одинаковы, а именно большему α соответствует бóльшая площадь. Отсюда следует, что при одной и той же расчетной обеспеченности варианты с регулированием и без него (или варианты с разной зарегулированностью стока) имеют неодинаковый суммарный объем дефицитов воды за годы вне пределов расчетной обеспеченности: чем выше зарегулированность стока, тем больше суммарный объем дефицитов.

Если суммарные дефициты перебойных лет при разной зарегулированности неодинаковы, то условно осредненный по всем годам

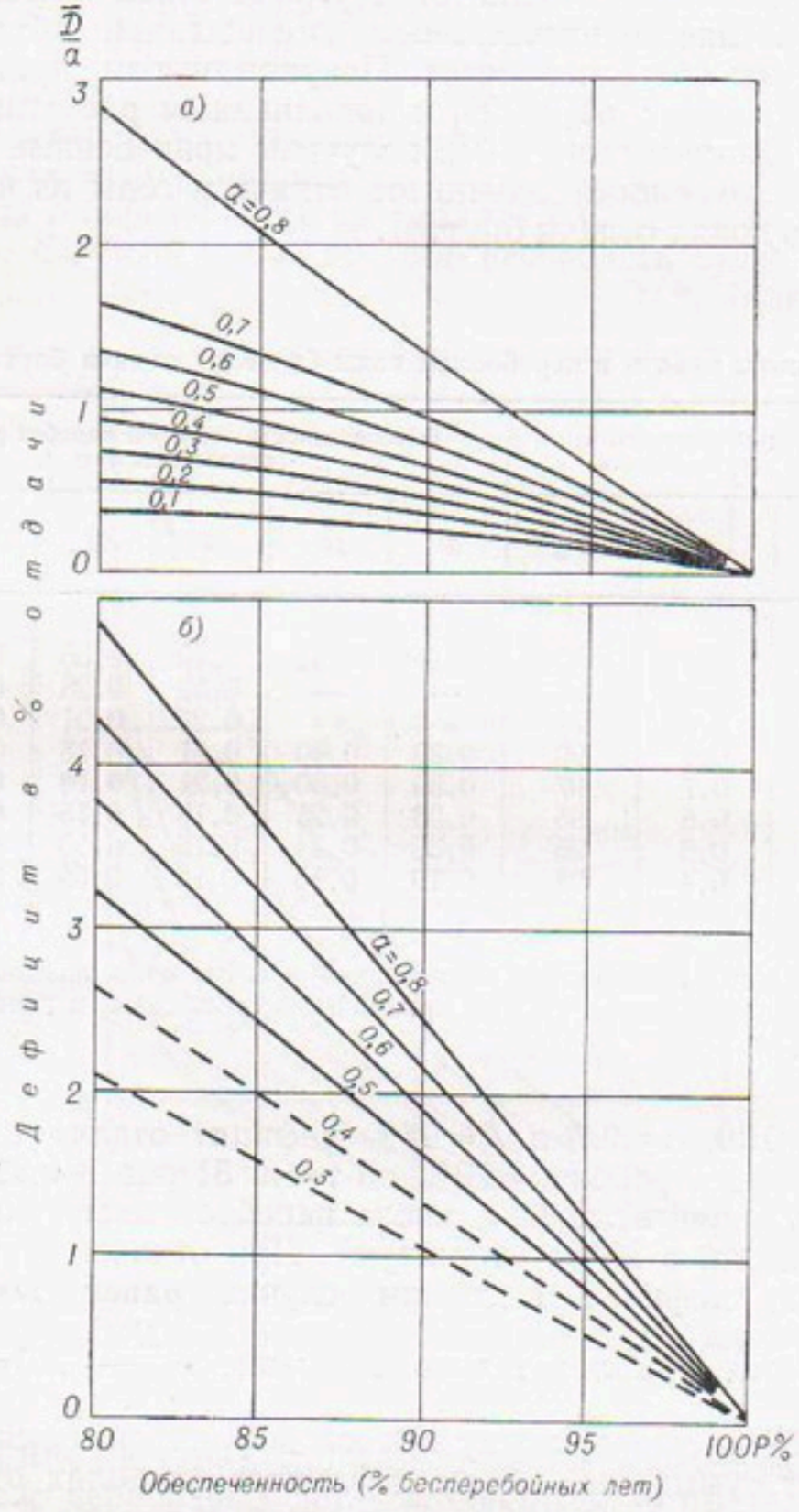


Рис. 58. Дефицит отдачи в зависимости от величины отдачи и ее обеспеченности.

а — для рек с малой изменчивостью стока (C_{vr}=0,3).
б — для рек с большой изменчивостью стока (C_{vr}=0,5).

многолетия дефицит воды при разных величинах α также будет неодинаковым, что видно на рис. 58 и из данных табл. 32.

Таблица 32

Средний годовой дефицит (в % от $A_{бр}$) отдачи водохранилища при разных значениях $C_{vг}$, P и α

α	Обеспеченность отдачи, %					
	80	85	90	95	97	99
			$C_{vг}=0{,}30$			
0,1	0,37	0,27	0,18	0,09	0,06	0,02
0,2	0,56	0,43	0,25	0,13	0,09	0,03
0,3	0,75	0,60	0,38	0,20	0,13	0,04
0,4	0,94	0,75	0,52	0,28	0,16	0,05
0,5	1,12	0,88	0,63	0,35	0,20	0,07
0,6	1,33	1,07	0,74	0,42	0,25	0,10
0,7	1,65	1,34	0,99	0,55	0,32	0,12
0,8	2,88	2,09	1,30	0,70	0,40	0,15
			$C_{vг}=0{,}50$			
0,1	0,92	0,70	0,47	0,24	0,14	0,05
0,2	1,41	1,06	0,71	0,38	0,22	0,08
0,3	2,09	1,57	1,05	0,53	0,31	0,11
0,4	2,63	1,98	1,32	0,67	0,40	0,14
0,5	3,23	2,41	1,61	0,80	0,48	0,16
0,6	3,80	2,85	1,90	0,94	0,56	0,19
0,7	4,31	3,23	2,15	1,07	0,64	0,22
0,8	4,82	3,63	2,45	1,24	0,74	0,25

Изложенное означает, что системы водоснабжения с одинаковой обеспеченностью потребления фактически являются «неравнопрочными» [61], если они базируются на различной зарегулированности стока. При высоком зарегулировании стока для тепловой электростанции последняя за время перебоев не выдаст больше энергии, чем при низком.

Суммарные дефициты отдачи при увеличении регулирования стока можно сделать такими же, как и при низком регулировании (или без такового), лишь путем уменьшения числа дефицитов. Это означает, что при регулировании стока следовало бы по чисто водохозяйственным обстоятельствам выделять добавку в полезной отдаче (как запас над водопотреблением), и тем большую, чем выше зарегулированность стока. Такая добавка в полезной отдаче соответствует некоторому повышению обеспеченности с увеличением регулирования стока.

Из данных табл. 32 видно, что при $C_v=0{,}30$ системы, работающие на бытовом стоке при $P=97\%$, по величине дефицита отдачи равноценны системам при $\alpha=0{,}45$ и $P=99\%$; системы с $\alpha\approx0{,}57$, $P=95\%$ и $\alpha=0{,}8$, $P=97\%$ также равноценны. При $C_v=0{,}50$ дефицит для системы при $\alpha\approx0{,}2$ и $P=97\%$ равен дефициту при $\alpha=0{,}7$ и $P=99\%$; то же при $\alpha=0{,}3$, $P=97\%$ и $\alpha=0{,}5$, $P=98\%$ и т. д.

Однако с увеличением обеспеченности уменьшается объем дефицитов, а в связи с ростом емкости при этом увеличиваются капиталовложения. Поэтому решение вопроса оказывается более сложным, чем оно представляется с чисто водохозяйственной стороны. Весьма важное значение при этом имеет вид кривой зависимости полных (и полезных) объемов от отметки НПГ водохранилища, изменение стоимости сооружений и затоплений с повышением НПГ и т. п. Большое значение имеет также экономика водо- и энергопотребления в зависимости от обеспеченности водопользования. Надо отметить, что факторы, связанные с водохозяйственной обеспеченностью, иногда могут быть оценены лишь условно или просто не поддаются экономическому расчету (см. § 4).

Изложенное позволяет сделать следующие выводы:

1. Более высокие коэффициенты регулирования и изменчивости стока дают более значительные средние годовые дефициты отдачи, меньшие дефициты свойственны малым α и C_v.

2. Снижение расчетной обеспеченности уменьшает рабочую емкость водохранилища, но увеличивает размеры среднего годового дефицита, и наоборот.

3. Наибольшая вероятность перебоев при многолетнем регулировании стока приходится на пусковой период водохранилища до заполнения его расчетной емкости при НПГ. Поэтому во время строительства плотины и в пусковой период установки следует соблюдать мероприятия для ускорения заполнения водохранилища, особенно при больших коэффициентах регулирования. Наращивание водопотребления должно быть согласовано с процессом заполнения.

4. Поскольку подавляющее большинство среди перебоев составляют малые перебои, то резервирование сравнительно небольшого объема воды, в размере хотя бы 10—20% отдачи брутто, или подвод такого же количества воды в случае перебоя из другого источника (например, подпитывание из канала Северский Донец — Донбасс при наступлении перебоев по водохранилищам Донбасса) существенно повышает обеспеченность работы водохозяйственных систем.

5. Расходование воды не более расчетного или допустимого, борьба с утечками из водохранилища через уплотнения затворов и другие устройства, возможное использование части мертвого объема в ряде случаев являются важными мероприятиями для соблюдения и повышения обеспеченности работы водохозяйственных систем.

6. При наличии данных для надежного обоснования перехода к уменьшению забора воды для смягчения наступающего перебоя следует переходить (во избежание полного прекращения водопользования) на снижение водопотребления, если сравнительно большой период с уменьшенным водопотреблением выгоднее для предприятия, чем угроза полной остановки его на более короткий период.

7. Повышение среднего годового дефицита и увеличение вероятного периода пускового заполнения водохранилища с повыше-

нием степени регулирования стока вовсе не означает отказ от высокого регулирования. Надо лишь знать, с чем это связано и назначать соответствующие мероприятия как во время строительства, так и при эксплуатации водохранилища. Решающими в этом вопросе являются обычно технико-экономические показатели, а иногда и некоторые дополнительные соображения.

§ 16. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА, ЕМКОСТИ И ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В предыдущих главах были рассмотрены вопросы регулирования стока применительно к конкретным гидрологическим и водохозяйственным условиям в бассейне реки. Однако и те и другие условия с течением времени эксплуатации установки могут изменяться.

В практике регулирования речного стока можно выделить две группы причин, вызывающих отклонения в эксплуатационном режиме водохранилищ от их проектного режима.

К первой группе причин относятся случайные ошибки в гидрологических параметрах (Γ_0, C_v, C_s, m), являющихся исходными данными для водохозяйственного проектирования, и преднамеренные изменения параметров стока и условий его регулирования во время эксплуатации. Сюда относятся возможные неточности в назначении нормы стока, стандарта, внутригодового распределения стока, изменения площади водосбора, мертвого и полезного объемов (при $V_{общ}$=const), размеров водопотребления, а значит и его обеспеченности $P\%$ и т. д.

Ко второй группе причин относятся те изменения, которые могут возникать с течением времени в речном стоке, так как норму и другие параметры стока в прошлом не всегда можно приравнять к соответствующим показателям в будущем. Это зависит от изменения физико-географических условий и элементов водного баланса водосбора в связи с хозяйственной деятельностью человека. Такое положение возможно в районах с межбассейновой переброской водных масс, развитием ирригации, прудового строительства и проведения агролесомелиоративных мероприятий (зяблевая вспашка, снегозадержание, устройство полезащитных лесных полос и т. д.). Значительное влияние на условия стока могут оказать гидротехнические работы, широко проводимые в последние годы.

В настоящее время не представляется возможным предвычислить и учесть в проекте некоторые из этих отклонений или изменений для достаточно длительного периода. Единственно реальным путем учета упомянутых изменений параметров стока и водного хозяйства является периодический (например, через каждые пять лет) пересмотр их с целью уточнения показателей водохозяйственной установки, что и предусматривается в условиях эксплуатации.

В проектировании необходима бывает также количественная оценка возможных поправок к водохозяйственным показателям при тех или иных изменениях стока, полезной емкости водохранилища (для заданного $V_{общ}$) и обеспеченности его работы.

Прием учета и величины поправок к отдаче водохранилища α соответственно изменениям гидрологических и водохозяйственных параметров для $\alpha=0{,}35\div0{,}80$, $C_{vг}=0{,}30\div0{,}70$, $m=0{,}40$ и $P=75\div97\%$ при изменениях Γ_0, C_v, m, $P\%$ и $V_{м.о}$ (для $V_{общ}=\text{const}$) даны в работах [77, 78].

Пользуясь этими поправками, можно определить отдачу водохранилища, не производя новых водохозяйственных расчетов, что важно при проектировании на первых его стадиях. Такой учет возможных отклонений гидрологических нормативов представляет собой гибкую систему приспособления водохозяйственных показателей установки к переменным условиям стока и водного хозяйства и позволяет изменять эти показатели вслед за нарушениями условий, имея лишь первичные проектные данные.

И, наконец, анализ влияния отклонений стоковых параметров на отдачу водохранилища имеет особо важное значение также для оценки необходимой точности или возможных допусков при определении того или иного гидрологического параметра.

По работе [78], упомянутый анализ сводится к следующему.

Влияние на отдачу водохранилища изменений нормы стока Γ_0 относительно слабо зависит от $P\%$, C_v и α. Чем больше изменяется Γ_0 (при $V_{общ}=\text{const}$), тем, конечно, больше отклоняется и отдача. Но это отклонение отстает от вызывающего его изменения нормы. Так, приращение Γ_0 на ±15—30% повышает отдачу примерно на ±10—20%. Отставание приращения отдачи объясняется тем, что с повышением Γ_0 снижается коэффициент емкости $\beta_п$, а значит и регулирующая способность водохранилища (при снижении Γ_0 $\beta_п$ увеличивается).

Изменения коэффициента $C_{vг}$ влияют на отдачу в обратном (по знаку) направлении. Понижение C_v увеличивает отдачу при заданных $\beta_п$ и $P\%$ или повышает $P\%$ при заданных α и $\beta_п$. Но относительное изменение отдачи, как и в предшествующем случае, отстает от изменения C_v и снижается с увеличением α. Так при $C_v=0{,}40$, $P=95\%$ и $\alpha=0{,}50$ изменение C_v на $\pm30\%$ влияет на отдачу в размере $\mp20\%$; при $C_v=0{,}40$, $P=95\%$ и $\alpha=0{,}80$ указанное изменение C_v влияет на отдачу лишь в пределах $\mp10\%$.

Влияние отклонений в величине стока межени m на отдачу сглаживается с повышением α, C_v и $P\%$. При существенном многолетнем регулировании и высоком значении $P\%$ практически возможные отклонения величины m от расчетной не оказывают значительного влияния на отдачу установки. Так, при $\alpha=0{,}5\div0{,}8$, $C_v=0{,}40$, $m=0{,}40$ и $P=95\%$ приращения величины m на $\pm25\%$ изменяют отдачу всего лишь на ±3—6%.

Мертвый объем, принятый первично в размере $\sim10\%$ от Γ_0, изменяясь затем в пределах от нуля до 25% от Γ_0 (при $V_{общ}=$

=const), незначительно влияет на отдачу при высоких α, C_v и $P\%$. С уменьшением этих параметров роль $V_{м.о}$ растет.

Перевод обеспеченности отдачи с 95%-ной на 97%-ную или с 97%-ной на 95%-ную (при $V_{общ}$=const) влияет на отдачу в размере 4—9% при C_v=0,30÷0,70 и α=0,35÷0,80%.

Отклонения коэффициентов асимметрии C_s от $C_s=2C_v$, по расчетам В. И. Мухопада (УкрВОДГЕО, 1963) влияют на отдачу таким образом: а) относительное изменение C_s больше относительного изменения α; б) при малых α и высоких $P\%$ и C_v изменения отдачи более существенны, чем при обратных соотношениях. При P=97%, α=0,50, C_v=0,70 и снижении C_s в 2 раза отдача падает на 27%, а при P=85% и прежних остальных параметрах она уменьшается на 7%; в) при P, равных 85 и 90%, изменения C_s в пределах от 25 до 75% от расчетного снижают отдачу на величину, изменяющуюся от 0 до 24% (последняя цифра относится к малому α и большому C_v). При P, равных 95 и 97%, снижение C_s до 25% от расчетного уменьшает отдачу на 48—67% при α=0,35 и C_v=0,6÷0,7.

Глава VII

РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА НА ПЕРЕМЕННУЮ ОТДАЧУ (ПО ДИСПЕТЧЕРСКИМ ПРАВИЛАМ) И ПРИ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

§ 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Неравномерность внутригодового хода стока и его непостоянство в разные годы для одних и тех же сезонов являются предпосылкой перехода к переменной отдаче водохранилища. При этом величина отдачи назначается в зависимости от времени года и от наличного на данную дату запаса воды в водохранилище, согласно специальным правилам управления его работой. Эти правила разрабатываются с учетом ожидаемого (с той или иной степенью вероятности) хода стока на основе данных о его режиме за прошедшие годы.

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

а) обеспечивать гарантированную водоотдачу;

б) выявлять избытки воды для использования их на повышение отдачи;

в) смягчать перебои отдачи за пределами расчетной обеспеченности, уменьшая глубину перебоев за счет увеличения их продолжительности;

г) снижать холостые сбросы;

д) устранять переполнение водохранилища над НПГ и МПГ.

Таким образом, составление правил управления, специфических для каждого водохранилища и оформляемых в виде диспетчерского графика, дает возможность повысить использование стока за счет необеспеченных избытков воды, появляющихся в любое время и в широких пределах. Понятно, что использование необеспеченных избытков воды возможно, если находятся потребители этой дополнительной отдачи. Такие возможности имеются для водоснабжения ряда предприятий и населенных пунктов из нескольких источников в маловодных районах (например, в Донбассе), для гидростанций, работающих в энергосистемах или обслуживающих так называемых потребителей-регуляторов, и для других водопользователей.

На диспетчерском графике по оси ординат отложены емкости водохранилища или соответствующие им отметки верхнего бьефа, а по горизонтальной оси — время года. Характерными линиями

поле графика разделено на несколько зон, каждой из которых соответствует режим работы водохранилища с определенными величинами отдачи. К характерным линиям диспетчерского графика относятся следующие.[1]

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

а) ветви опорожнения, ограничивающей упомянутую зону в период межени и не допускающей чрезмерной сработки водохранилища;

б) ветви весеннего наполнения, обеспечивающей создание к концу половодья необходимого запаса воды для поддержания отдачи в межень.

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

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

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

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

Противоперебойная и противосбросовая линии охватывают своими ветвями следующие части емкости:

а) в узких границах неполного годового регулирования стока (при $A_{бр}<M_P+П_P$) эти линии проводятся от НПГ до ГМО, т. е. распространяются на всю полезную емкость водохранилища (рис. 59 *а*);

б) если водохранилище имеет бóльший полезный объем (соответственно степени регулирования в пределах от неполного годового при $Г_P>A_{бр}>M_P+П_P$ до высокого многолетнего регулирования) и эксплуатируется с полной ежегодной сработкой до ГМО, то при этом весенние сбросы уменьшаются, использование стока повышается (хотя гарантированная отдача при многолетнем регулировании падает по сравнению с вариантом регулирования стока без ежегодной сработки до ГМО). В таком случае для предотвращения излишних перебоев при неполном годовом регулировании на отдачу $A_{бр}=M_P+П_P$ противоперебойная линия охватывает нижнюю часть графика (ниже точки *е* на рис. 59 *б*), заполняемую обеспеченным объемом половодья $П_P$ с учетом отдачи за весну; противосбросовая линия, как и в первом случае, проходит через всю емкость от НПГ до ГМО;

[1] Противоаварийная линия, назначаемая во избежание превышения максимального и катастрофического горизонтов, рассматривается в § 46.

в) при многолетнем регулировании и сравнительно высокой степени неполного годового регулирования стока ($Г_Р > А_{бр} > М_Р + П_Р$) обе линии проводятся в пределах от НПГ до наинизшей в конце межени диспетчерской точки a, означающей сработку, заполняемую расчетным маловодным половодьем (при поддержании в течение половодья гарантированной отдачи). Определение расчетного половодья приведено ниже.

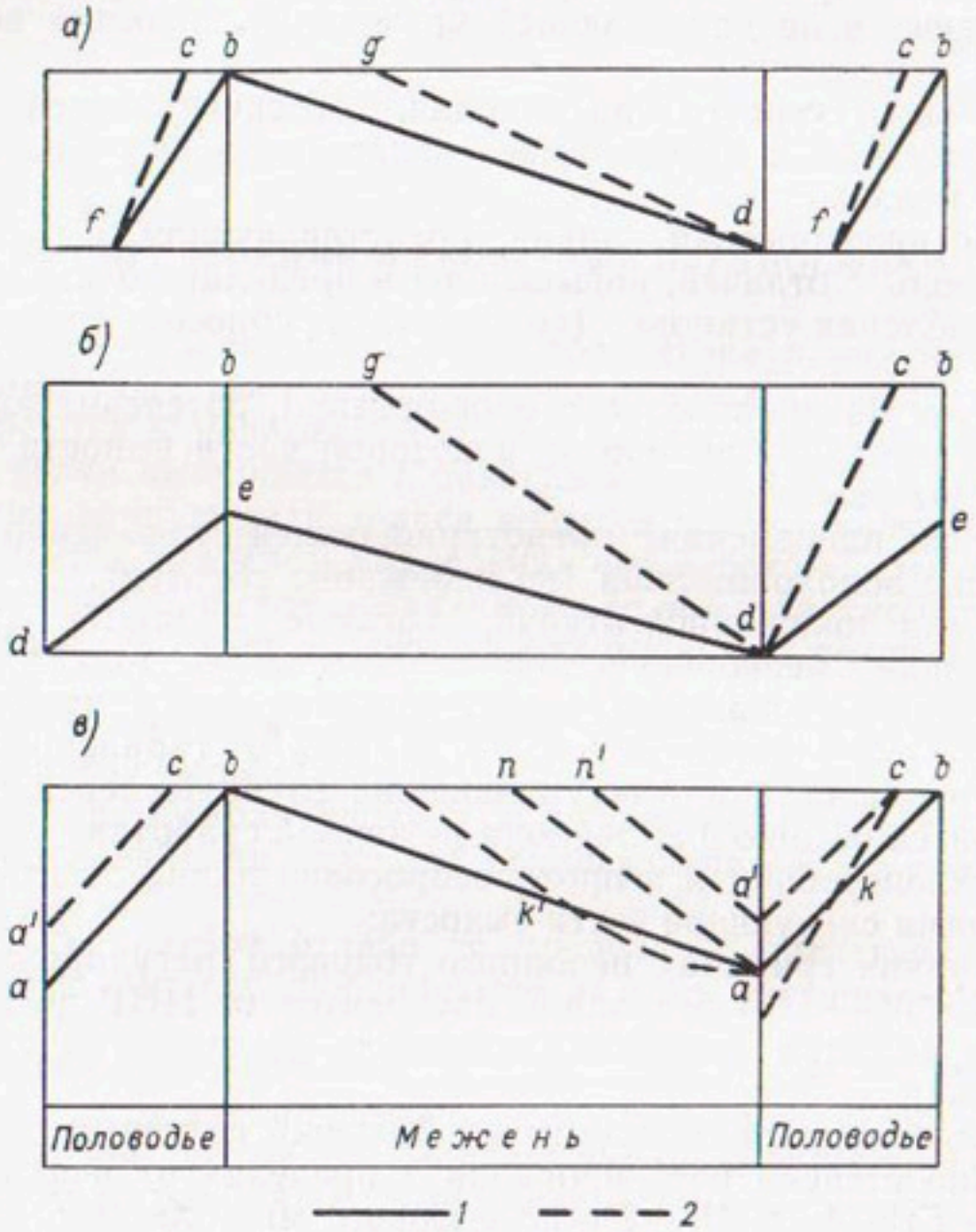


Рис. 59. Схемы очертания противоперебойной (*1*) и противосбросовой (*2*) линий при различных степенях регулирования стока.

Противоперебойные линии для указанных трех типовых случаев следующие:

1) для неполного годового регулирования при $А_{бр} < М_Р + П_Р$ — линия fbd (рис. 59 *а*);

2) для гарантированной отдачи $А_{бр} = М_Р + П_Р$, но при наличии водохранилища избыточных размеров и при ежегодной сработке его до ГМО — линия ded (рис. 59 *б*). Выше точки e имеется избыточная емкость, причем водохранилище могло бы обеспечить более значительную гарантированную отдачу;

3) для многолетнего и неполного годового регулирования при $Г_Р > А_{бр} > М_Р + П_Р$ — линия aba (рис. 59 *в*).

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

Противосбросовая линия, как отмечено, имеет назначение предотвращать чрезмерно быстрое заполнение емкости. Соответственно обе ветви этой линии строятся по повышенной отдаче (до полной производительности установки) и с учетом нескольких различных по распределению, но одинаковых по объему обеспеченных многоводных меженных (и весенних) объемов стока, а в качестве искомой противосбросовой линии принимается нижняя огибающая для обеих ветвей:

1) для регулирования на отдачу $А_{бр} < М_Р + П_Р$ — линия $gdfc$ (рис. 59 *а*). Длина отрезка df зависит от степени регулирования и от производительности установки. Наличие этого отрезка означает, что в многоводные половодья и при опорожненном водохранилище к их началу не удается избежать холостого сброса даже при работе установки с полной производительностью на протяжении половодья;

2) для регулирования на отдачу $А_{бр} = М_Р + П_Р$ при избытке емкости — линия gdc (рис. 59 *б*);

3) для многолетнего и неполного годового регулирования при $Г_Р > А_{бр} > М_Р + П_Р$ — ломаная $n'a'c$ или $nakc$ (рис. 59 *в*).

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

Статистические характеристики для сезонных объемов стока (весна, межень) и расчетные величины этих объемов определяются по фактическим рядам стока в жестких календарных датах. Жесткие даты деления года на сезоны постоянны для всех лет и назначаются с таким расчетом, чтобы фактическое половодье вмещалось в весенний сезон практически при всех сроках начала половодья (ранних и поздних). Назначением жестких дат весеннего сезона определяются одновременно постоянные границы межени.

Варианты моделей распределения стока для весны и межени отбираются также из фактических рядов, но не в жестких границах, а по фактической продолжительности каждого отобранного сезона и с приводкой объемов стока этих фактических сезонов к расчетному объему стока в жестких датах. При отсутствии

гидрометрических рядов модели распределения стока выбираются по рекам-аналогам, имеющим такие данные.

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

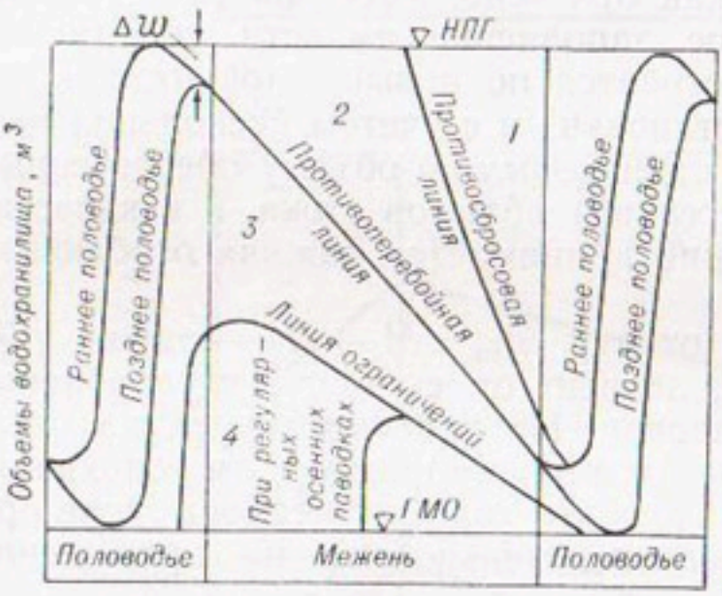


Рис. 60. Вид диспетчерского графика при сезонном регулировании стока.

1 — зона полной производительности установки, *2* — зона повышенной отдачи, *3* — зона гарантированной отдачи, *4* — зона ограничений.

Иначе обстоит дело с весенними половодьями. Половодье не может повториться после израсходования воды от снегозапасов; оно лишь перемещается во времени, чему соответствует *скользящая шкала* времени. С применением этой шкалы отсчеты времени при построении огибающих для ветвей диспетчерского графика ведутся не по календарю, а от различных в разные годы моментов начала весеннего подъема половодья. Кроме изложенных условий, являющихся исходными для построения диспетчерского графика, укажем еще одно обстоятельство, которое возникает в процессе построения и состоит в следующем.

При вычерчивании огибающих в отдельных случаях нельзя избежать частичного сглаживания некоторых точек на графике с соблюдением тенденции в направлении кривой. В частности, это относится к построению основной, наиболее ответственной линии графика — противоперебойной линии. В зависимости от требуемой обеспеченности, длительности гидрометрических наблюдений, а значит и числа отобранных моделей распределения стока маловодных сезонов крайние, резко отскакивающие от других точки или участки кривых могут иногда не приниматься во внимание. В отдель-

ных случаях приходится допускать некоторое сглаживание кривых с тем, чтобы общая конфигурация диспетчерского графика соответствовала очертанию линий рис. 60. Потребность в таких поправках вызывается малочисленностью выборки, которой мы обычно располагаем. По замечаниям С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [61], даже выборка из 50—60 членов не может исчерпывающе характеризовать различные очертания элементов половодной волны.

В некоторых случаях построение диспетчерских линий затрудняется в связи с нечеткостью хода сработки водохранилища в межень (с промежуточными заполнениями до НПГ в отдельные маловодные годы), что зависит от степени регулирования стока. При очень низких коэффициентах регулирования заполнение водохранилища во многие годы происходит и на протяжении межени. Для таких условий применение диспетчерских графиков теряет смысл, так как сработка емкости для задержания весеннего стока не может дать существенного эффекта, поскольку ее размеры незначительны по сравнению с суммарным стоком реки. В подобных случаях емкость практически можно использовать только для соблюдения отдачи во время провалов стока, а в остальное время водохранилище остается заполненным до НПГ. При этом емкость, отдача и другие водохозяйственные показатели определяются на основе статистической обработки результатов регулирования стока по ряду лет, как рекомендует, например, П. А. Ляпичев [70].

§ 18. ПРИЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ЛИНИЙ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ГРАФИКА

Противоперебойная линия

При режиме работы с обеспечением постоянной по годам отдачи значительная предвесенняя сработка водохранилища не всегда имеет место, поэтому случаи сочетания глубокой сработки с последующим исключительно маловодным половодьем довольно редки. Иное положение будет, если водохранилище при работе с получением избыточной (над гарантированной) отдачи будет ежегодно срабатываться к весне на значительную величину или даже полностью (в некоторых случаях неполного годового регулирования стока). В таком случае вероятность перебоев увеличится. Поэтому, соблюдая надежность обеспечения гарантированной водоотдачи и используя водохранилище для получения избытков воды, можно допускать лишь такую сработку водохранилища в течение меженного маловодья, при которой обеспечивается наполнение до НПГ при низком стоке половодья.

Как показали С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61], полная сработка водохранилища к концу межени без нарушения гарантийности водоотдачи возможна лишь в тех случаях неполного годового регулирования, когда годовая отдача $A_{бр}$ равна или меньше суммы

обеспеченных величин стока межени M_P и весны $П_P$, т. е. $A_{бр} \leqslant M_P + П_P$.

Величины стока M_P и $П_P$ для указанных пределов отдачи являются расчетными при построении диспетчерского графика. При этом допустимая сработка $W_д$ к началу половодья равна полезной емкости водохранилища

$$W_д = V_п = П_P - A_в.$$

Здесь $A_в$ — гарантированная отдача брутто за весну, составляющая в сумме с отдачей за межень $A_м$ годовую величину $A_{бр}$

$$A_в + A_м = A_{бр}.$$

При высоких степенях регулирования в пределах отдачи от $A_{бр} = M_P + П_P$ до $A_{бр} = Г_0$ диспетчерская ежегодная сработка к концу межени определяется по стоку половодья по формуле

$$П = П_P + (П_0 - П_P) \frac{A_{бр} - (M_P + П_P)}{Г_0 - (M_P + П_P)}, \qquad (55)$$

где $П_0$ — средний сток половодья; $Г_0$ — среднегодовой сток (норма); $П_P$, M_P — величины стока половодья и межени с обеспеченностью, равной обеспеченности отдачи. Эти характеристики определяются по статистическим параметрам стока указанных сезонов в постоянных календарных границах.

Диспетчерская сработка $W_д$ и расчетный сток за межень M для указанных границ годовой отдачи будут составлять:

$$W_д = П - A_в, \qquad (56)$$

$$M = A_м - W_д. \qquad (57)$$

Во избежание излишних перебоев правила сработки должны быть приурочены к наиболее позднему началу половодья. Иначе говоря, диспетчерская ежегодная сработка есть величина опорожнения емкости к концу межени в годы с запаздывающими половодьями. Поскольку расчетный сток межени определяется в жестких, постоянных для всех лет календарных границах этого сезона, то в ряде фактических лет могут потребоваться дополнительные объемы воды для поддержания гарантированной отдачи за пределами указанных сроков (при раннем окончании предшествовавшего половодья и позднем начале последующего). Это необходимо учитывать при определении полной емкости водохранилища, предназначенного для работы по диспетчерскому графику, в особенности в границах неполного годового регулирования при $Г_P > A_{бр} > M_P + П_P$ с ежегодной сработкой до ГМО.

Определив расчетный сток и величину диспетчерской сработки, переходим к построению самих ветвей сработки и наполнения противоперебойной линии. Для этого из фактических рядов стока отбирается несколько случаев маловодной межени и несколько случаев маловодного половодья (те и другие могут относиться к раз-

личным годам). Межень в фактических годах учитывается не в жестких границах, а от момента, когда весенний спад доходит до величины гарантированного расхода отдачи, до момента, когда весенний подъем следующего половодья начинает превышать упомянутую величину. Аналогично этому назначаются границы для подсчета объема стока маловодной весны.

Из всех выделенных таким образом случаев половодья и межени оставляются для дальнейших построений те из них, которые сравнительно мало отклоняются по объему стока от расчетных объемов. Необходимо, чтобы среди отобранных случаев маловодья были примеры наиболее раннего начала межени и случаи наиболее позднего окончания ее. Маловодные половодья желательно распределить (если выборка достаточно многочисленна) на рано начинающиеся и с поздним началом.

Для устранения отклонений в объемах стока половодья и межени фактических лет от расчетных объемов стока производится приводка стока отобранных сезонов к расчетным величинам, для чего все среднемесячные (или среднедекадные) расходы отобранных сезонов умножаются на отношение сезонных объемов расчетного и фактического.

Построение ветви сработки (ходом назад) для каждого отобранного случая с приведенными расходами производится с учетом гарантированной отдачи, начиная с момента окончания межени (в каждом примере свое окончание) до достижения наибольшего наполнения.

Во избежание ошибок сток в течение некоторого времени (вблизи начальной точки) должен учитываться по интервалам не более пятидневных или декадных. Надо иметь в виду, что наибольшая сработка возможна в середине интервала и несколько позже начала весеннего повышения стока, поскольку это повышение сперва происходит медленно. Поэтому укрупнять интервалы перед половодьем и в начале его недопустимо. То же относится и к графику отдачи, или среднесуточных нагрузок ГЭС, если он задается не в виде плавной кривой, а в ступенчатой форме (желательно, чтобы не было резкой разницы в высоте смежных ступеней).

В момент окончания межени (начальный момент расчета) объем водохранилища принимается равным объему при НПГ минус объем диспетчерской сработки $W_д$.

Верхняя огибающая кривых сработки определяет расчетные наполнения водохранилища и принимается за ветвь сработки противоперебойной линии. Аналогичным образом строятся и ветви наполнения. Построение, как отмечено, начинается с того момента на спаде половодья, когда расходы воды в реке снижаются до расхода гарантированной отдачи. Принимается, что в этот момент водохранилище наполнено до НПГ. Учитывая приведенные расходы каждой маловодной весны (из числа отобранных) и соблюдая гарантированную отдачу, строятся кривые наполнения в направлении, противоположном ходу времени. Верхняя огибающая этих кривых (если нельзя выделить две огибающих — для ранних и поздних (половодий) принимается за ветвь наполнения противоперебойной линии. При низких степенях регулирования ($Л_{бр} < М_р + П_р$)

эта ветвь пересекается с осью абсцисс в более поздний момент, чем ветвь сработки (точка f на рис. 59 $а$). Следовательно, некоторое время в начале половодья водохранилище может оставаться пустым, что не вызовет перебоя в связи с избытком стока над гарантированной отдачей.

В случаях более высокого регулирования стока ($M_P+П_P<$ $<A_{бр}<Г_0$) при отсутствии условий для применения скользящей шкалы времени в качестве ветви наполнения противоперебойной линии принимается также верхняя огибающая аналогичных кривых, отвечающая расчетному стоку половодья и пересекающаяся в его начале с ветвью сработки. При применении скользящей шкалы времени начальная для расчета точка наполненного водохранилища скользит по верхнему участку ветви сработки, занимая в каждом году положение, соответствующее фактическому началу половодья (см. рис. 60). Поэтому для построения ветви наполнения графика в каждом конкретном году верхняя огибающая кривых наполнения сдвигается по времени соответственно фактическому сроку начала половодья, причем верхняя точка ее смещается на графике вниз на величину Δw, которая для данного года не требуется в связи с запозданием половодья.

В условиях эксплуатации и при проектировании диспетчерский график применяется к каждому конкретному половодью с учетом фактической даты его начала. При этом каждый раз ветвь наполнения вычерчивается по интерполяции между граничными ветвями раннего и позднего начала половодья.

Противосбросовая линия

Для построения ветвей противосбросовой линии объемы стока многоводной межени и многоводного половодья определяются по статистическим параметрам для обеспеченности $100-P$, где P — обеспеченность гарантированной водоотдачи. Затем из фактического ряда отбираются сезоны с объемами стока, близкими к расчетным. После приводки стока к расчетным величинам выполняется ходом назад расчет наполнения и сработки с учетом полной производительности установки, т. е. максимального полезно используемого расхода воды.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61] различают два основных типа построения противосбросовой линии.

Первый тип соответствует отсутствию сбросов в расчетное половодье; это проявляется в том, что ветви противосбросовой и противоперебойной линий не пересекаются (первые располагаются выше вторых). Такие случаи наблюдаются при значительной диспетчерской емкости, большой производительности установки и при сравнительно невысоких и растянутых половодьях (эти условия могут быть в отдельности или в комбинации). При этом построение начинается с кривых наполнения.

Для начала расчета принимается полное водохранилище в тот момент на спаде половодья, когда расход воды в реке снижается

до величины полной производительности установки. На основе серии кривых проводится нижняя огибающая до начала половодья (точка a' на рис. 59 *в*). От этой точки также ходом назад и при полной производительности установки строятся кривые для межени, нижняя огибающая которых принимается за ветвь сработки противосбросовой линии $n'a'$.

Второй тип соответствует наличию сбросов в расчетное половодье; это выявляется тем, что ветвь противосбросовой и ветвь противоперебойной линий в половодье пересекаются, и потому первая доводится только до точки пересечения (точка k на рис. 59 *в*). Участок противосбросовой линии ниже точки пересечения отбрасывается, и режим водохранилища для соблюдения гарантийности отдачи ориентируется по участку ak противоперебойной линии. Такие случаи наблюдаются при относительно небольшой емкости водохранилища, малой производительности установки и сосредоточенных половодьях.

Построение восходящей ветви akc для второго типа ничем не отличается от построений для первого типа. Участок ветви, заменяемый противоперебойной линией, используется как граница, с превышением которой каждый раз необходимо немедленно переходить на полную производительность установки для уменьшения холостых сбросов.

Кривая сработки an противосбросовой линии для второго типа почти ничем не отличается от построений для первого типа, но начинается от самой нижней точки диспетчерского графика (самый нижний конец противоперебойной линии), причем от этой точки ходом назад до жесткой границы раздела фаз расчет ведется по стоку фазы половодья, а далее до НПГ — по стоку фазы межени, соблюдая на обоих участках полную производительность установки.

Возможны случаи, когда на некотором участке ветвь сработки проходит ниже соответствующей ветви противоперебойной линии. Это означает, что даже при работе с полной производительностью установки в указанном интервале в многоводные годы невозможно выполнить всю диспетчерскую сработку к началу весны. Поэтому в таких случаях еще в межень, к началу упомянутого интервала, необходимо стремиться сработать емкость водохранилища до противоперебойной линии для уменьшения сбросов весной.

Могут встретиться также случаи, когда ветвь наполнения располагается ниже (более полого) соответствующей ветви противоперебойной линии. Такое соотношение диспетчерских линий означает, что в многоводные годы возможность холостых сбросов распространяется на более поздние сроки по сравнению со сроками, когда появляется опасность незаполнения водохранилища в маловодные годы. При этом режим водохранилища ориентируется на соблюдение противоперебойной ветви наполнения с немедленным переходом каждый раз на полную производительность установки при превышении наполнения сверх этой линии. Во всех случаях, когда это возможно, построение ветви наполнения противосбросовой линии должно производиться с применением скользящей

шкалы времени (с выделением раннего и позднего половодья). При этом точки сопряжения половодья и предшествующей межени должны приурочиваться к наиболее раннему началу половодья (в отличие от задач расчета емкости и построения противоперебойной линии, которые связываются с наиболее поздним началом половодья).

Следует отметить, что во всех случаях сработка избытков в зоне между противосбросовой и противоперебойной линиями может вестись соответственно хозяйственным потребностям и не всегда на полную производительность установки при переходе к противоперебойной линии. Для гидростанций и энергосистем имеет значение при этом также колебание напора и заменяемых тепловых мощностей. Поэтому зона избыточных расходов разделяется иногда дополнительными линиями, построенными при отдаче, равной, например, $1{,}25Q_г$, $1{,}50Q_г$, $1{,}75Q_г$ и т. п. ($Q_г$ — расход гарантированной отдачи).

Выбор режима сработки избытков следует согласовывать с возможностями водопотребления, величиной $W_д$, производительностью насосной станции, режимом речного стока и другими местными условиями.

При широкой возможности использования избытков, ограниченной емкости $W_д$ и в условиях стока с повышением его осенью желательна помесячная сработка, т. е. в течение месяца с момента обнаружения избытка. При наличии большой емкости $W_д$ и отсутствии осеннего повышения стока целесообразно более равномерное освоение избытков из расчета до конца межени, так как при этом опасение за недоиспользование их отпадает. При всяких иных сроках сработки избытков величину дополнительной отдачи следует назначать как отношение избытка к длительности срока.

Во всех случаях дополнительная отдача периодически (например, через месяц) корректируется соответственно новому избытку емкости, поскольку приток и другие гидрометеорологические факторы с течением времени изменяются.

Граница зоны сокращенной отдачи

Если уровень водохранилища опустился ниже зоны гарантированной отдачи, причем, судя по ходу уровней водоема и наличной (или прогнозной) гидрологической обстановке, намечается тенденция к дальнейшему падению уровней, то этим самым выясняется возможность или неизбежность перебоя. Для смягчения глубины перебоя (за счет увеличения продолжительности урезанной отдачи, что более выгодно для большинства предприятий и населенных мест) целесообразно заблаговременно и постепенно сокращать отдачу, не доводя водохранилище до полного опорожнения. Для этого вводятся градации пониженной отдачи: $0{,}8Q_г$, $0{,}6Q_г$ и т. п. Переход к каждой из этих градаций должен означать, что обеспеченность поддержания до конца межени урезанной отдачи должна быть не ниже принятой обеспеченности для полной отдачи.

Переход к первой, пониженной отдаче, а затем при необходимости и ко второй, более пониженной отдаче назначается в случаях, когда при стоке расчетной обеспеченности запас воды в водохранилище оказывается недостаточным для устранения полного опорожнения водохранилища до начала ближайшего половодья. Соответственно этому расчет производится по нескольким годам с низким меженным стоком, близким по объему к меженному стоку с обеспеченностью P, принятой для гарантированной водоотдачи. Затем выполняется приводка стока и ходом назад производится расчет ветвей сработки для вариантов отдачи $0{,}8Q_г$, $0{,}6Q_г$ и т. д., начиная от опорожненного водохранилища в конце межени. Верхние огибающие наполнений, соответствующие различным понижениям отдачи, принимаются за верхние границы зон урезанной отдачи. При этом общая обеспеченность пониженной отдачи фактически будет больше обеспеченности стока, принятого для построений, так как, кроме расчетного стока, на величину обеспеченности отдачи оказывает влияние его наступление вслед за предшествующим перебойным маловодьем.

Если на реке не наблюдается ежегодных осенних паводков, то граница зоны ограничений распространяется на всю межень и снижается до отметки ГМО в конце половодья. При наличии постоянных осенних паводков зона ограничений может и не захватывать всей межени, выклиниваясь на отметке ГМО к концу осеннего повышения стока. Поскольку зоны пониженной отдачи начинаются построением от пустого водохранилища, рассчитываются по обеспеченному стоку и при неполном водопотреблении, то эти зоны занимают самую нижнюю часть графика. Между верхней линией пониженной отдачи (например, $0{,}8Q_г$) и противоперебойной линией находится зона гарантированной отдачи. Эта зона при сезонном регулировании стока значительно меньше, чем при многолетнем регулировании, когда ежегодно к началу половодья сохраняется значительный переходящий объем.

Заканчивая рассмотрение вопроса о режиме водопотребления во время перебоя, отметим, что в эксплуатационных условиях при этом надо различать две основные группы водопотребителей: 1) использующие не только отдачу, но и наполнение водохранилища (напор); 2) использующие только водоотдачу.

Для первой (гидростанции) группы целесообразен режим работы по схемам понижения отдачи при наступлении перебоя, так как снижение выработки энергии гидростанций зависит не только от уменьшения расхода, но и от уменьшения напора при сработке водохранилища.

Вторая группа водопользователей снижает свою продукцию не только в зависимости от количества недоданной воды, но и от режима водопотребления во время перебоя (полное прекращение или только снижение водозабора) или примерно в прямой пропорции от количества недоданной воды и независимо от режима работы во время перебоя.

В первом случае полное, но сравнительно кратковременное прекращение водопотребления является более тяжелым, чем довольно длительная работа с пониженным водопотреблением. При этом необходим переход на схему понижения забора воды при наступлении перебоя.

Во втором случае переход на схему пониженного водопользования при угрозе перебоя нецелесообразен. Тепловым электростанциям, например, особенно при наличии резерва мощности в энергосистеме, нет смысла включать агрегаты

задолго до половодья лишь на том основании, что по предположению (или прогнозу) до конца года водохранилище может не получить пополнения. Поскольку при наличии резервов мощности речь идет лишь об энерговыработке, которая пропорциональна недодаче воды, то заблаговременное уменьшение мощности ГРЭС в случае перебоя не уменьшает энерговыработки, а в условиях неустойчивого режима стока малых рек может оказаться напрасным.

Изложенный прием построения диспетчерских линий в основном для *водоснабжения* является одним из вариантов практически приемлемых решений. При этом не исключаются и другие возможные решения. Например, построение огибающей ветви сработки противоперебойной линии можно ограничивать жесткими календарными датами межени, не распространяя огибающую за пределы указанных границ. Тогда участки ветви сработки, выходящие за пределы жестких границ межени, дополняются путем расчета по стоку начала и конца половодья тех лет наблюдений, для которых эти отрезки оказываются наиболее маловодными. Такой прием определения общей продолжительности сработки и поправок емкости на возможную растянутость сработки по диспетчерскому графику позволяет учесть и другие затяжные межени, а не только наблюдающиеся в маловодные годы, по стоку которых производится основное построение противоперебойной линии.

Еще одна разновидность приемов построения противоперебойной линии состоит в следующем. С момента окончания межени (при жесткой календарной дате) как от постоянного начала ходом назад определяются статистические параметры и величины стока, соответствующие расчетной обеспеченности. Так, например, если конец межени для всего многолетия приурочен в 28/II, то по фактическим рядам можно определить среднюю величину стока за месяц (февраль), коэффициент изменчивости и обеспеченный сток за месяц (февраль). То же самое можно найти за два месяца (январь, февраль), три месяца (декабрь, январь, февраль) и т. д. по март включительно (год). При этом на начало каждого месяца мы находим обеспеченный объем стока, на который можно рассчитывать до окончания межени.

Таким же образом можно просуммировать величины водопотребления, начиная с 28/II (за 1—28/II, 1/I—28/II, 1/XII—28/II и т. д.). Вычитая обеспеченный объем стока на начало каждого месяца, ожидаемый до конца межени, из суммарного водопотребления, необходимого от той же даты до конца межени (с учетом потерь), можем найти объем воды, который должен быть в водохранилище на эту дату для поддержания до конца межени (28/II) обеспеченной водоотдачи. Ясно, что этот объем должен быть увеличен на ту добавочную емкость, которая вызывается возможной растянутостью межени и определяется по вышеизложенному.

Линия, проведенная по ординатам полученных расчетом емкостей (со смещением вверх соответственно упомянутой поправке) и распространенная до дат раннего окончания и позднего начала половодий, может быть принята за ветвь сработки противоперебойной линии.

Прием построения диспетчерских линий навстречу течению времени (ходом назад) является общим для всех режимов водопотребления. В частности, для гидростанций такой прием расчета оказывается единственно возможным, так как для регулирования мощностей в расчет входит также и напор, от которого при заданной мощности зависит расход. Но в тех случаях (как и в приведенном ниже примере), когда расход воды и полная производительность установки не зависят от уровня водохранилища, построение диспетчерских линий можно вести, не задаваясь начальными уровнями и при любом направлении расчета — по ходу времени или против него. Достаточно совместить вычисленные графики хода емкости с диспетчерской границей опорожнения при построении ветви сработки противоперебойной линии и с линией полного водохранилища (или с верхним участком ветви сработки) при построении ветви наполнения.

В случаях *энергетического* использования стока диспетчерский график показывает отдачу не в виде расходов, а в виде мощностей, средних для каждой его зоны.

При сезонном и многолетнем регулировании стока полезная емкость, а значит и соответствующие зоны диспетчерского графика связаны с целым рядом специальных условий и понятий. Поэтому построение упомянутого графика перенесено в гл. X. Здесь отметим лишь, что верхняя и нижняя границы гарантийной зоны строятся по разным расходам, учитывая влияние на напоры уровней верхнего и нижнего бьефов.

Диспетчерская емкость, т. е. объем ежегодной сработки, определяется по вышеизложенному, с использованием формул (55)—(57). Для построения вариантов сработки емкости $W_д$, которая, как известно, близка к величине сезонной составляющей, отбираются годы с меженным стоком, близким к расчетному (M). Затем выполняется корректировка меженного стока умножением на определяемый подбором коэффициент, при котором происходит сработка всей емкости $W_д$, начиная с НПГ при соблюдении выравненной обеспеченной мощности $N_р$, средней или распределенной по месяцам согласно графику нагрузок.

Верхняя огибающая вариантов сработки принимается за противоперебойную линию. При необходимости начало и конец сработки могут быть раздвинуты с увеличением емкости $W_д$ и длительности межени, принятой для расчета $W_д$. При этом возможно уточнение всего расчета, начиная с α.

Нижняя граница гарантийной зоны есть аналогично построенная огибающая, конец которой достигает ГМО, а начало приурочено к наполнению, равному $W_д$. Для построения вариантов сработки отбираются другие годы или принимаются те же, но корректируются так, чтобы срабатывалась вся емкость $W_д$ до ГМО при соблюдении мощности $N_р$. Понятно, что в связи с понижением напоров нижняя граница образуется при расходах, бóльших, чем верхняя.

Получение линий урезанной мощности, как и ступеней дополнительной отдачи, требует иной корректировки расходов, соответственно величине урезки или повышения мощности N_P: $0{,}9N_P$, $0{,}8N_P$, и т. д. или $1{,}1N_P$, $1{,}2N_P$ и т. д. В первом случае корректируются расходы нижней границы, во втором — верхней.

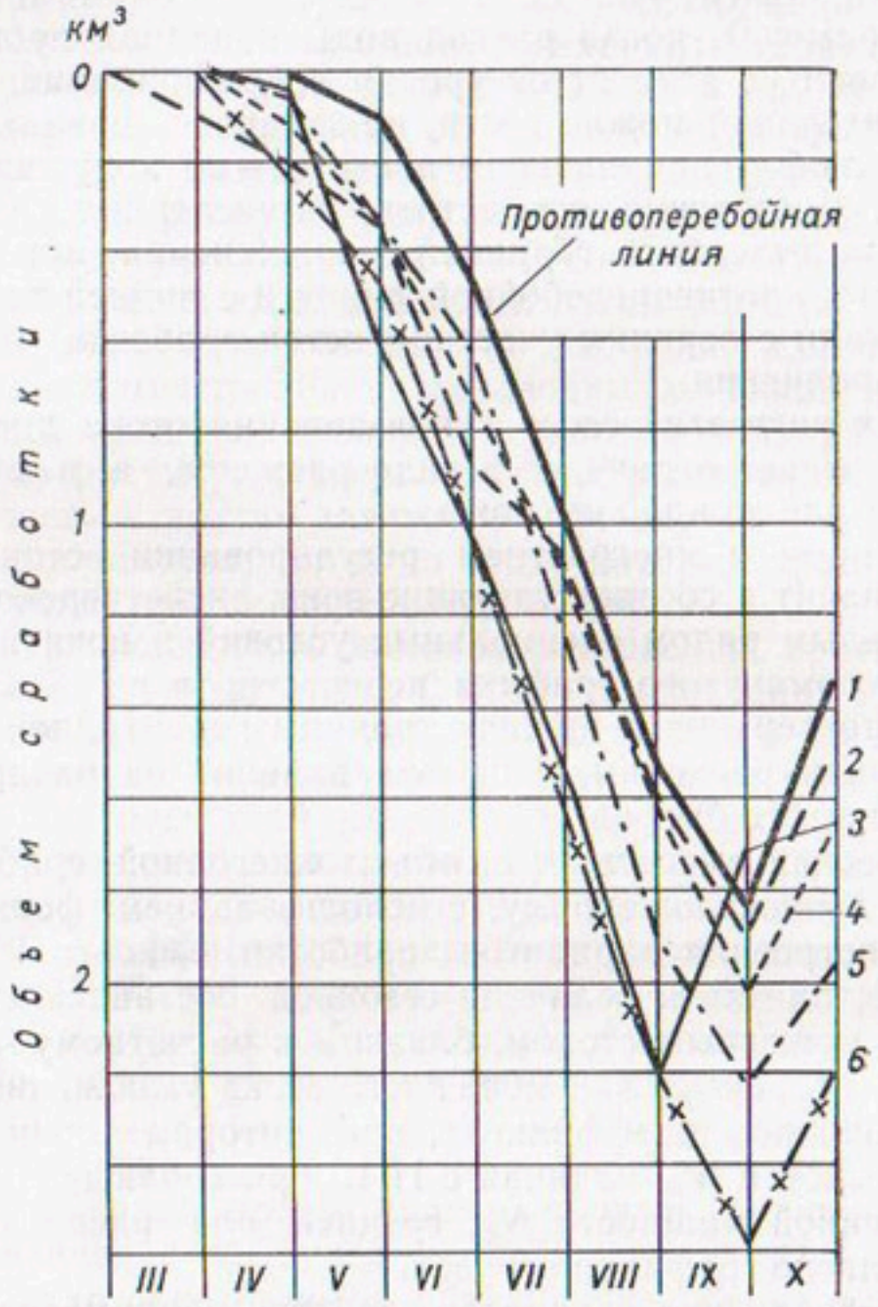


Рис. 61. К определению емкости водохранилища и противоперебойной линии графика его работы для орошения.

1 — 1962-63 г., *2* — 1909-10 г., *3* — 1903-04 г., *4* — 1942-43 г., *5* — 1945-46 г., *6* — 1949-50 г.

При *ирригационном* использовании стока построение диспетчерских графиков в принципе остается таким же, как и для водоснабжения. В частности, построение противоперебойной линии производится вместе с определением диспетчерской емкости. В случаях годового регулирования (и наличии небольшого переходящего объема) при этом устанавливается полная емкость водохранилища.

Рассмотрим определение емкости и построение противоперебойной линии сработки водохранилища полного годового регулирования для орошения в мае—сентябре при обеспеченности нормальной отдачи $P=0{,}9$ (90%). Длительность ряда данных о стоке $n=70$ лет. Число обеспеченных лет равно nP или $(n+1)P$, а перебойных $n(1-P)$ или $n(1-P)-P$. В данном случае это составляет 6 лет.

Из наличного стокового ряда следует отобрать 7—8 лет с наиболее маловодными сезонами вегетации и для фактического стока (без приводки) ходом вперед построить кривые сработки за нормальную отдачу в указанный сезон для всех отобранных лет.

Огибающая для 5—6 кривых обобщает по верхним точкам внутримесячную неравномерность притока, если построения подекадные, или принимается целиком по ходу сработки какого-нибудь года, если сработка велась по месяцам. Возможен также комбинированный вариант, по которому основная часть кривой относится к одному году, а остальной участок ее графически подсоединяется к кривой сработки другого года.

Во всех этих случаях построения (и выбора) противоперебойной линии она должна занять такое положение, которое разделяет все возможные сработки водохранилища на две категории.

Выше противоперебойной линии располагаются сработки с нормальной и избыточной отдачей; ниже этой линии находятся сработки конкретных перебойных лет, общее число которых равно установленному. Глубина перебоев или снижение отдачи должно составлять не более 15—25% ее нормальной величины. Следует проанализировать размеры полезной емкости в зависимости от величины допустимого снижения отдачи на 15, 20, 25% и т. д., учитывая частоту допускаемого снижения за весь ряд лет.

В данном случае при снижении отдачи на 15% емкость водохранилища 2,6 км³, согласно расчетам Л. К. Котовой, определилась по самому маловодному 1949-50 г. Противоперебойная линия принята по ходу сработки на полную отдачу в 1962-63 г. Ниже этой линии имеется пять перебойных лет (рис. 61).

§ 19. ПОСТРОЕНИЕ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ГРАФИКА ДЛЯ МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ПРИ ОГРАНИЧЕННОСТИ ГИДРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Многие водохранилища на малых реках из-за отсутствия достаточных данных о стоке рассчитаны вероятностным методом на постоянную отдачу по обобщенным статистическим параметрам стока и эксплуатируются без диспетчерских графиков. Между тем можно построить диспетчерские графики и для этих случаев в полном соответствии с вышеизложенными принципами.

В частности, сток половодья $П_р$ и межени $М_р$ находят по обобщенным статистическим параметрам стока. Это позволяет определить объемы $П$, $W_д$ и $М$.

Отметим некоторые особенности расчета.

Противоперебойная линия. Объем меженного стока, установленный по формуле (57), распределяется внутри года согласно известным в гидрологии обобщенным моделям и фактическим маловодным годам с приводкой их меженного стока к расчетному.

Как видно из формулы (56), величина $W_д$ зависит от $A_в$, т. е. от продолжительности весны, а значит и межени. Поэтому требуется рассматривать обычно два варианта $W_д$ — для наиболее длительных сроков межени, например, $t=10$ месяцам и $t=11$ месяцам, чему соответствуют емкости W_{10} и W_{11}. При этом, согласно формуле (57), величина M не зависит от длительности межени t, так как изменение t одинаково влияет на $A_м$ и $W_д$.

Из формул (56) и (57) видно, что объем расчетного годового стока точно равен годовой отдаче брутто, т. е. $Г=M+П=A_г$.

Учитывая месячный приток, потери и емкости диспетчерской сработки, строятся варианты противоперебойной линии. По каждому варианту путем подбора в расчет вводятся такие условные полезные отдачи, при которых, начиная от полного водохранилища в конце половодья (в начале апреля или мая), диспетчерские емкости, например W_{10} и W_{11}, соответствующие разной продолжительности межени, целиком срабатываются к концу ее (к концу февраля или марта). Такое построение удовлетворяет принципу обеспечения годовой отдачи брутто, принятой в расчете емкости постоянной по всем годам периода сработки (в отличие от полезной отдачи, которая фактически в этом периоде от года к году увеличивается, но принимается осредненной за весь период с тем, чтобы соблюсти удобства для потребителя и не снижаться до ее минимума в первый год периода сработки, вблизи НПГ).

За основу принимается верхняя огибающая или близкая к ней кривая. Концы ее могут быть заменены соответственно ходу сработки по другим вариантам — годам, причем так, чтобы была охвачена наибольшая реальная продолжительность межени с учетом раннего ее начала и позднего окончания при непрерывной сработке от НПГ до полного исчерпания диспетчерской емкости в конце межени.

Таким образом, окончательная величина $W_д$ из осторожности принимается по наиболее продолжительной межени (например, в Донбассе для $t=11$ месяцам). При этом диспетчерская емкость может оказаться более сезонной емкости, определенной по формулам при расчете водохранилища, что при заданном НПГ потребует уточнения полезной отдачи с последующим уточнением величин $П$, $W_д$ и положения огибающей.

Условные полезные отдачи, соответствующие разным $W_д$ (W_{10}, W_{11}, и т. п.), используются только для построения верхней границы гарантийной зоны, и в дальнейшем они не требуются.

Ветвь наполнения противоперебойной линии для указанных водохранилищ практического значения почти не имеет и потому может быть нанесена схематически, исходя из безусловного заполне-

ния диспетчерской емкости до НПГ при соблюдении гарантированной отдачи весной и с учетом притока $П$ по формуле (55).

Линии дополнительных расходов. Зона сработки избытков емкости (сверх противоперебойной линии) для удобства эксплуатации установки разделяется по величинам дополнительной отдачи (млн. м³/мес.). Разделение выполняется из расчета сработки избытка, например, в течение месяца с момента обнаружения избытка емкости (сверх гарантированной) на эту дату или в течение оставшейся части межени, до конца ее, и т. п.

Линии дополнительной отдачи при сработке ее в течение месяца строятся следующим образом (рис. 62).

По противоперебойной линии на середине каждого месяца определяются объемы водохранилища. К ним добавляют, например, 1, 2, 3, и т. д. млн. м³ и для этих новых (увеличенных) объемов и соответствующих им площадей находят потери воды на фильтрацию и испарение за данный месяц. Затем потери x суммируют с полезной величиной дополнительной отдачи ($1+x$, $2+x$, $3+x$ и т. д.) и откладывают над противоперебойной линией в начале каждого месяца. Соответственные точки соединяются прямыми линиями, проходящими по месяцам межени. Между ними дополнительная полезная отдача определяется интерполяцией, соответственно наличному наполнению на любую дату.

Если сработка избытков растягивается до конца межени, линии дополнительной отдачи строятся ходом назад, начиная с конца межени, например с конца февраля, от объема $W_к$ после сработки диспетчерской емкости. Затем определяется потребная емкость на начало февраля

$$V_н = V_к + V_в + V_п - V_Q, \qquad (58)$$

где $V_в$ — объем водопотребления за этот месяц, $V_в = nQ_г$; $Q_г$ — гарантированный расход из водохранилища, млн. м³/мес.; $n = 1{,}2$; 1,4; 1,6 и т. д.; V_Q — объем расчетного меженного притока в этот месяц при учете притока за всю межень по формуле (57); $V_п$ — объем потерь на фильтрацию и испарение, соответствующих середине месяца, т. е. объему $(V_н + V_к) : 2$.

Поскольку $V_н$ и $V_п$ взаимно связаны, то для каждого месяца они находятся подбором, причем $V_н$ для февраля принимается за $V_к$ для января и т. д. При таком попятном (во времени) построении линия $1{,}2Q_г$ или $1{,}4Q_г$ и т. д. продолжается до пересечения с НПГ. От любой точки на линии до конца межени при этом учтены потери, указанный забор воды и приток по месяцам расчетной межени.

Нижняя граница гарантийной зоны и зона урезанной отдачи. При эксплуатации водохранилища на постоянную отдачу перебой наступил бы сразу же после исчерпания полезной емкости как резкий вынужденный переход на отдачу, равную естественному, т. е. незначительному притоку в период межени.

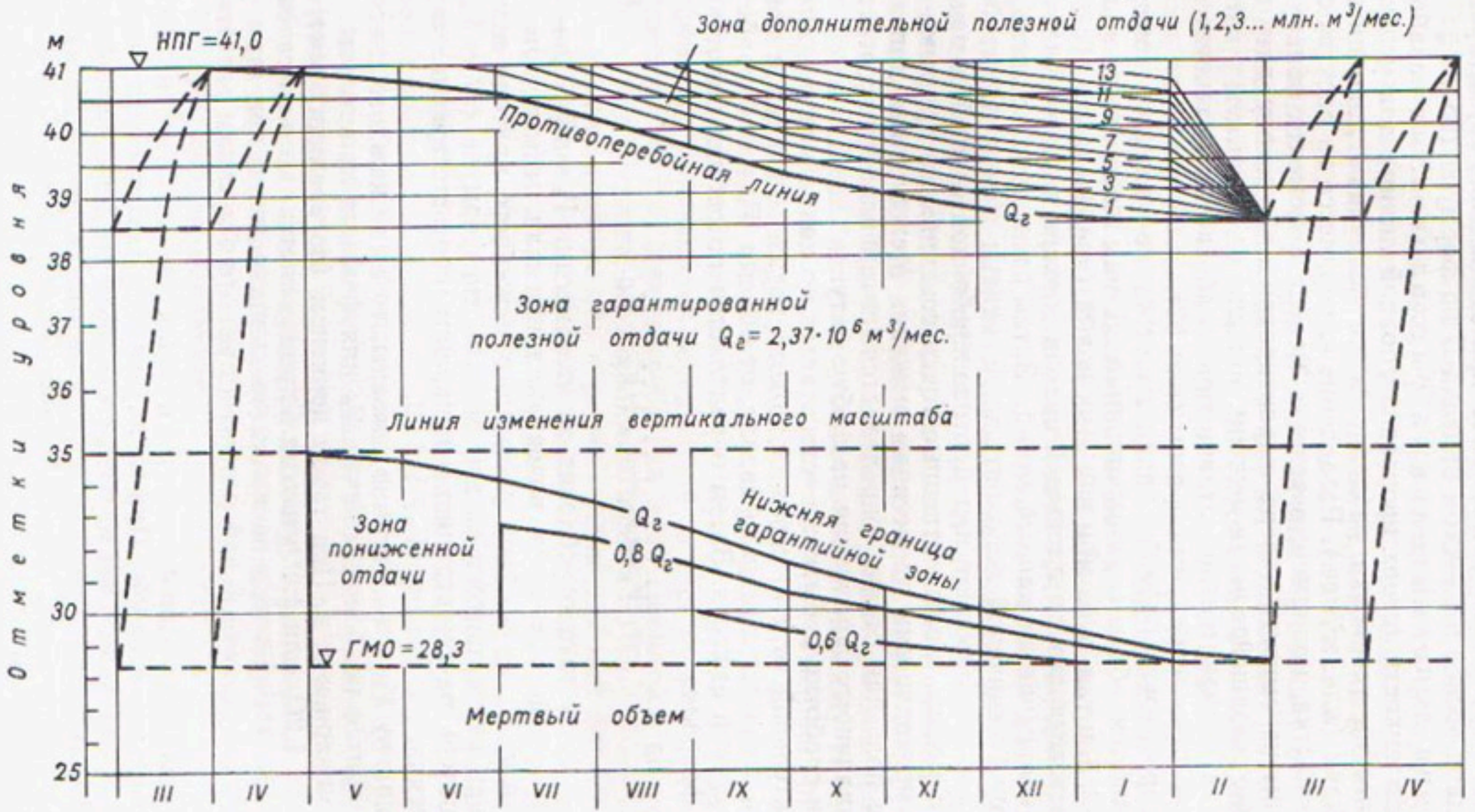


Рис. 62. Основные линии диспетчерского графика при многолетнем регулировании стока для водоснабжения.

При регулировании по диспетчерскому графику такое резкое снижение отдачи исключается за счет некоторой заблаговременности перехода на урезанную отдачу, т. е. за счет известного увеличения длительности перебоя при меньшей его глубине.

В случаях многолетнего регулирования гарантийная зона довольно широка, а при высокой обеспеченности отдачи ($P = 95$ или 97%) приближение к нижней границе этой зоны будет довольно редким. Упомянутую границу можно построить по отдаче и стоку, принятым в расчетах противоперебойной линии. Ординаты нижней границы рассчитываются ходом назад по формуле (58), начиная с известного ГМО.

Как только наличный объем при регулировании по диспетчерскому графику опускается за пределы зоны гарантированной отдачи, необходимо переходить на урезанную полезную отдачу, для которой выделяются обычно две зоны: 1) для $0{,}8Q_г$; 2) для $0{,}6Q_г$. Порядок построения тот же, что и для границ гарантийной зоны, но отдача учитывается с соответствующим ограничением.

Отметим в заключение, что основной элемент графиков — диспетчерская емкость — остается весьма устойчивым. При неблагоприятных сочетаниях возможных отклонений в коэффициентах изменчивости стока весны и межени (при величине ошибок в этих параметрах до ±30% и более) величина диспетчерской емкости изменяется слабо — до 10%.

Это позволяет считать использование диспетчерских графиков, построенных по обобщенным характеристикам стока, надежным средством повышения эффективности эксплуатации водохранилищ.

§ 20. ПРИМЕНЕНИЕ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ГРАФИКОВ, ИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ВЗАИМОСВЯЗЬ С ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ РАСЧЕТАМИ. ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ГРАФИКА

Использование графиков в проектировании и эксплуатации установок

Диспетчерские графики применяются как при проектировании, так и в условиях эксплуатации.

При проектировании, если имеется достаточно длительный ряд гидрометрических наблюдений непосредственно в изучаемом створе или же представляется возможность составить такой ряд по соседним пунктам (или рекам), необходимо, пользуясь диспетчерским графиком, определить фактический режим регулирования стока, характеристики зарегулированных расходов, потери и т. п. при работе водохранилища на переменную отдачу.

Регулирование стока по диспетчерскому графику легко выполняется табличным способом расчета.

Наполнение в начале первого года подбирается таким, чтобы оно оказалось равным наполнению в конце последнего года. Поэтому предварительно следует установить, каковы будут

наполнения в конце ряда, начиная от ближайшего к концу безусловно полного водохранилища.

Установив начальное наполнение, производим расчет (обычно по месячным или декадным интервалам времени), причем наполнение водохранилища в начале каждого следующего расчетного интервала времени устанавливается по результатам предшествующих вычислений. Имея наполнение для начала интервала, по диспетчерскому графику соответственно этому наполнению и дате, на которую оно приходится, определяем зарегулированный расход, а с учетом фактической величины стока за интервал находим емкость к концу этого интервала, являющуюся начальной для следующего, и т. д.

Однако сток, а значит и наполнение в течение интервала непрерывно изменяются. При эксплуатации водохранилища отдача в течение интервала может неоднократно корректироваться в соответствии с его наполнением. При проектировании во избежание перехода к очень коротким интервалам в некоторых случаях (на границах зон, при возможностях перехода из одной зоны в другую) промежуточная корректировка выполняется следующим образом.

Пусть в начале интервала наполнение несколько превышает противоперебойную линию. Это значит, что можно было бы на протяжении интервала принять расход отдачи, равный максимальной производительности установки $Q_{пр}$. В таком случае для всего интервала следует принять:

а) максимальный расход $Q_{пр}$, если при такой отдаче наполнение водохранилища в конце интервала не выходит из своей зоны;

б) гарантированную отдачу $Q_г$, если при такой отдаче наполнение в конце интервала также окажется в зоне $Q_г$;

в) промежуточный расход воды, при котором линия фактического наполнения водохранилища выходит к концу интервала точно на противоперебойную линию, если этот расход достаточно велик или на противосбросовую линию, если расход мало превышает $Q_г$.

Аналогичная корректировка применяется и для иных случаев перехода наполнения из одной зоны в другую [переход к пониженной (урезанной) отдаче, холостым сбросам и т. п.].

Потери воды при регулировании стока по диспетчерскому графику определяются по соответствующим наполнениям, осредненным между величинами для начала и конца каждого месяца (или декады). Расчет потерь производится только на протяжении тех отрезков времени рассматриваемого многолетнего периода, в течение которых не происходит холостых сбросов воды. Определение потерь в этом случае производится для учета фактически используемого стока. При этом в годы с избыточным стоком (многоводные, средние и умеренно маловодные годы, в которые обнаруживаются избыточные наполнения) испарение можно принять соответствующим средним годам. Приближенно величина потерь на испарение и фильтрацию в среднем за многолетие соответствует

наполнению $V = V_{м.о} + (0{,}7 \div 0{,}8) V_{п}$, т. е. более высокому, чем для маловодного критического периода сработки. Для этого периода потери определяются с учетом специально для него установленных нормативов испарения, а расчет производится для определения обеспеченной полезной отдачи водохранилища (см. § 14).

В конце каждого года при табличном расчете диспетчерского регулирования (при проектировании) дается строка средних за год: притока, забора, потерь и сброса воды. Балансированием их контролируются расчеты за год с учетом изменения емкости от начала к концу года. Такая же строка дается в конце расчетов для контроля за весь ряд лет и получения итоговых цифр.

Управление работой водохранилища по диспетчерскому графику вызывает соответствующее изменение в величине полезной емкости водохранилища.

Выше отмечалось, что при работе водохранилища по диспетчерскому графику по сравнению с работой на постоянную во все годы отдачу требуется некоторая дополнительная емкость для поддержания отдачи при затяжном меженном сезоне и для устранения опасности незаполнения водохранилища в половодье, т. е. необходима поправка к объему водохранилища. Упомянутая поправка для сезонной составляющей емкости (или для полной емкости при сезонном регулировании) учитывается автоматически при использовании верхней огибающей кривых сработки, охватывающей раннее окончание и наиболее позднее начало половодий, т. е. представляющей наиболее длительную межень.

Понятно, что расчетный меженный сток M, относящийся к интервалу времени в жестких датах, в случае необходимости может быть распределен на весь удлиненный сезон маловодья, охватываемый огибающей кривой. Распределение происходит по месяцам (декадам) из расчета: приток равен гарантированной отдаче плюс или минус изменение емкости за интервал плюс потери воды из водохранилища.

Та же поправка к сезонной емкости может быть учтена при видоизменении приема построения ветви сработки противоперебойной линии. Можно, например, ограничить основную часть ветви жесткими датами меженного сезона и достроить ее концы особо, в соответствии с изложенным.

Таким образом, режим эксплуатации водохранилища по диспетчерскому графику в значительной мере накладывает свой отпечаток на методику расчетов и даже на величину емкости при той же гарантированной водоотдаче, что и в случае регулирования на постоянную во все годы отдачу. Использование прогнозов стока дополнительно усложняет построение графика и режим эксплуатации.

Однако ввиду невысокой точности и недостаточной заблаговременности прогнозов стока использование их для широкого маневрирования емкостью водохранилища оказывается затруднительным. Все же хотя изложенные здесь правила регулирования стока не связаны с прогнозами, тем не менее при наступлении критических условий для водного хозяйства использование краткосрочных

(за одну-две недели) и потому достаточно надежных прогнозов вполне возможно и является, безусловно, целесообразным.

В частности, такие краткосрочные прогнозы (точнее, гидрологические информации) могут быть эффективно использованы при критических условиях (накануне полного исчерпания водохранилища, незадолго до весны). При таких обстоятельствах гидрологическая информация может помочь решению вопроса о поддержании гарантированного минимума отдачи или о переходе к пониженной отдаче, о степени понижения и т. п.

Наконец, касаясь использования диспетчерского графика в эксплуатации (с учетом или без учета гидрологических информаций), отметим, что абсолютное соблюдение диспетчерских линий практически затруднительно и нецелесообразно. При постоянно изменяющемся режиме стока, потерь и других элементов водного баланса пришлось бы часто и иногда резко менять производительность насосной станции, подающей воду на очистные сооружения или в заводские резервуары.

Во избежание этого подача воды из водохранилища производится соответственно его наполнению по диспетчерскому графику и равномерно в течение некоторого интервала времени. В зоне избыточных расходов этот интервал может быть равным, например, одному месяцу. Однако в тех случаях, когда наполнение находится вблизи противоперебойной линии или вблизи нижней границы гарантийной зоны, надо следить за тенденцией хода сработки. Понятно, что при этом не следует назначать «нервный» режим. Но все же при подаче воды следует перейти от сработки избытков к гарантийному режиму или к режиму ограничений (а также соблюсти обратный переход в этих режимах) лишь при устойчивом отклонении от линий, ограничивающих зону гарантированной отдачи, — противоперебойной линии и нижней границы этой зоны. Изменение режима при этом следует назначать тогда, когда тенденция в ходе уровня приведет к отклонению его вверх или вниз от упомянутых линий на 10—20 см.

Эксплуатация водохранилища в пределах зоны гарантированной отдачи не исключает возможности кратковременной форсировки отдачи по требованию потребителей воды (в случаях аварий на других источниках водохозяйственной системы и т. п.). Однако последующий режим водохранилища должен быть строго подчинен условиям заполнения его до НПГ в ближайшее половодье.

Понятно, что если в водоеме имеются настолько большие запасы, что до весны перебой появиться не может, то с упомянутым восполнением спешить не следует: заполнение может произойти в ближайшую весну. Но если из-за форсировки отдачи в дальнейшем, до начала весны или вообще до очередного заполнения на отметку НПГ, произойдет перебой в отдаче, то при нормальном режиме, без форсировки, этот перебой мог бы отсутствовать или быть менее глубоким.

Диспетчерский график четко показывает зону, в которой излишне взятое количество воды не подлежит восполнению и действи-

тельно является дополнительной отдачей, и зону, в которой форсировка отдачи в дальнейшем частично или полностью должна быть возмещена путем уменьшения водоотбора.

Таких направляющих ориентиров или границ для разделения и контроля водопользования при эксплуатации водоемов «по требованию» не имеется. В ряде случаев забор воды производится с излишней осторожностью, что иногда ведет к напрасным сбросам воды через водослив; в других случаях забирается объем воды, который в значительной мере должен быть возмещен. Но при отсутствии ориентиров остается неизвестным, что этот объем подлежит компенсации, а такой же объем и при том же наполнении, но взятый несколько позже, компенсации не подлежит.

В результате отсутствие средств контроля в виде диспетчерского графика приводит к значительно меньшему использованию речного стока и к дополнительным глубоким длительным искусственно вызванным перебоям.

Эффективность диспетчерского регулирования и обоснование размеров водопроводных сооружений

Являясь средством оперативного и вполне сознательного управления работой водохранилища при любых гидрологических и водохозяйственных ситуациях, диспетчерский график позволяет исключить перебои, возникающие в связи с бессистемным использованием установки. Это подтверждается данными фактической эксплуатации водохранилищ Донбасса «по требованию» по сравнению с режимом работы по диспетчерским графикам, построенным ВНИИГиМ в 1964—1966 гг. (табл. 33). Один из них показан на рис. 62.

Данные табл. 33 показывают, что полезная отдача по графикам оказалась значительно больше гарантированной — на 22% по Карловскому водохранилищу и до 90% по Исаковскому (с учетом притока в него шахтных вод).

Для нейтрализации влияния водности периода эксплуатации отдача по графикам сравнивается с фактической за тот же период. Хотя такое сравнение неравноценно, так как при фактической форсировке отдачи появлялись глубокие и длительные перебои, все же и при этом дополнительная отдача по графикам, без перебоев, оказалась существенной. Лишь по Карловскому водохранилищу отдача по графику оказалась не более фактической, но последняя сопровождалась за 18 лет глубокими и длительными перебоями в течение двух лет. По Ольховскому водохранилищу такой же перебой был один год. В остальных примерах превышение отдачи по графику над фактической (без графика) изменяется от 27% по Старо-Крымскому водохранилищу и до 57% — по Елизаветинскому (не говоря об Исаковском).

Использование стока с применением графиков существенно повышается даже по сравнению не с проектным (гарантированным), а с рискованным фактическим режимом: для Старо-Крымского

Таблица 33

Результаты диспетчерского регулирования стока водохранилищами Донбасса

№ п/п	Наименование водохранилищ	Общий объем V_0 10^6 м³	Период регулирования, количество лет	Средний сток за период регулирования, 10^6 м³/год	Естественная норма стока $Г_0$ 10^6 м³/год	Коэффициент регулирования α	Гарантированная полезная отдача $Q_г$ млн. м³/год	Полезная отдача, 10^6 м³/год	
								по диспетчерскому графику, $Q_д^п$	фактическая (без графика), $Q_ф^п$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Старо-Крымское	52,0	10	49,6	45,6	0,70	30,0	42,4	34,2
2	Ольховское . .	26,8	18	37,0	28	0,70	16,65	26,0	20,0
3	Карловское . .	25,0	18	17,2	15	0,79	9,0	11,0	11,0
4	Елизаветинское	5,8	11	11,2	9,5	0,50	4,03	7,38	5,07
5	Исаковское . .	23,0	12	57,0	32,6	0,58	16,58	31,4	20,04

№ п/п	Наименование водохранилищ	$Q_д^п - Q_г$		$Q_ф^п - Q_г$		$Q_д^п - Q_ф^п$		Использование стока, %		Особенности регулирования	
		(9) − (8)	$\frac{(9)-(8)}{(8)} \cdot 100\%$	(10) − (8)	$\frac{(10)-(8)}{(8)} \cdot 100\%$	(9) − (10)	$\frac{(9)-(10)}{(8)} \cdot 100\%$	по графику $\frac{(9)}{(6)} \cdot 100$	фактическое $\frac{(10)}{(6)} \cdot 100$	по диспетчерскому графику	фактические (без графика)
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Старо-Крымское	12,4	41	4,2	14	8,2	27	93	75	Бесперебойное	Бесперебойное
2	Ольховское . .	9,35	56	3,35	20	6,0	36	93	72	,,	Один перебой
3	Карловское . .	2,0	22	2,0	22	0,0	0	73	73	,,	Два перебоя
4	Елизаветинское	3,35	83	1,04	26	2,3	57	78	54	,,	Бесперебойное
5	Исаковское . .	14,82	90	3,46	21	11,4	69	96	62	,,	,,

водохранилища на 93 — 75 = 18%, для Ольховского на 21%, для Елизаветинского на 24%.

Таким образом, эксплуатация водоемов по диспетчерским графикам надежно обеспечивает ценный водохозяйственный эффект, абсолютные значения которого, без допущения искусственных перебоев, составляют: по Карловскому водохранилищу 2,0 млн. м³/год, по Ольховскому 9,35 млн. м³/год, по Старо-Крымскому 12,4 млн. м³/год, по Елизаветинскому 3,35 млн. м³/год и т. д.

Однако приращения полезной отдачи и размеры водопроводных сооружений — взаимно связанные величины.

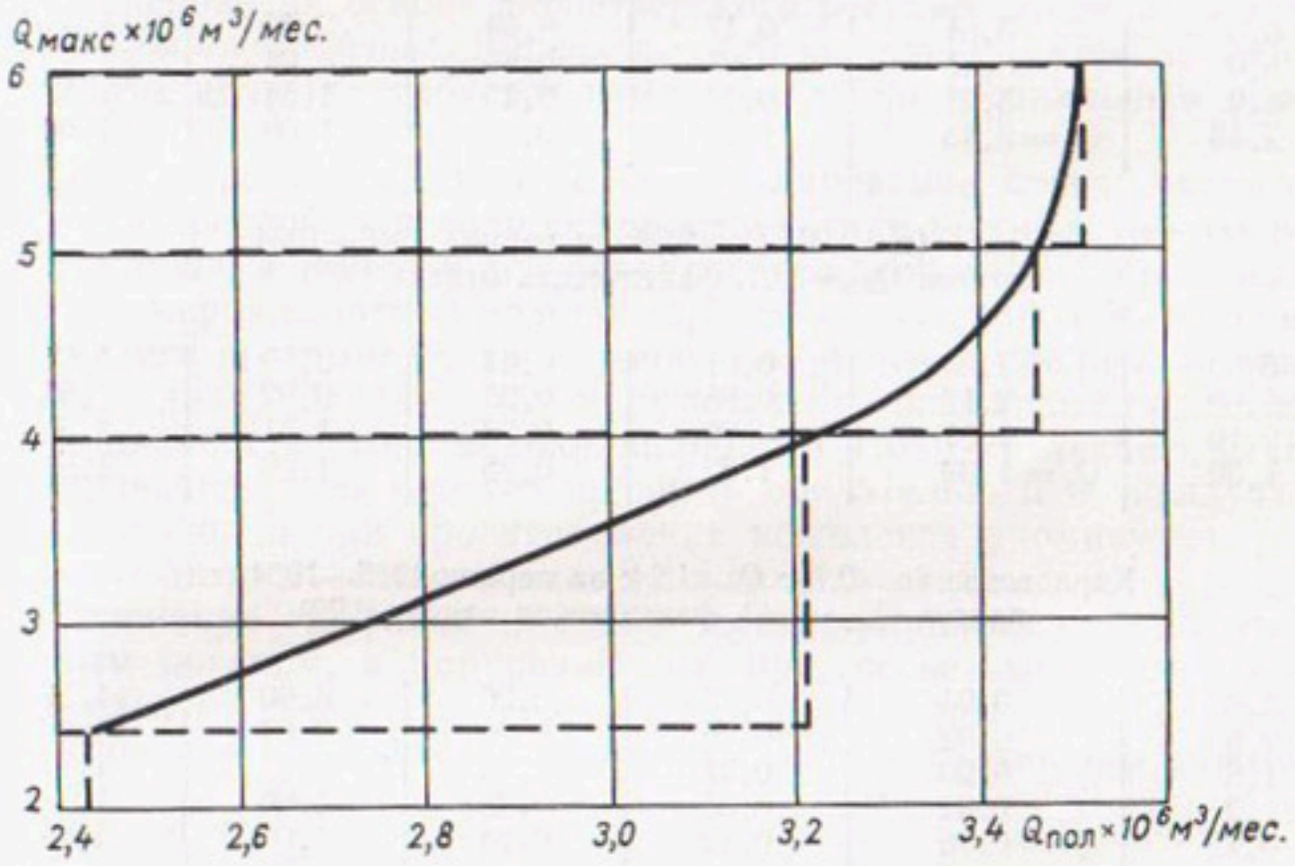


Рис. 63. Зависимость средней полезной отдачи ($Q_{пол}$ м³/мес.) от производительности установки ($Q_{макс}$ м³/мес.).

При наличии диспетчерского регулирования стока можно расчетами обосновать необходимую производительность водозаборной насосной станции, диаметр подающего водовода, размеры резервуара чистой воды и других сооружений системы водоснабжения, привязанной к водохранилищу.

Исходными для этого являются технико-экономические расчеты (по вариантам — ступеням приращения дополнительной отдачи) на основе графика изменения общей полезной отдачи в зависимости от максимальной производительности насосной станции при установленных параметрах водохранилища — коэффициенте регулирования, гарантированной полезной отдаче и т. п. (табл. 34, рис. 63).

Для построения указанной зависимости необходимо лишь составить 10—15-летний ряд среднемесячных расходов воды в реке (больший ряд — для высокого α) и произвести регулирование стока водохранилищем по диспетчерскому графику.

Максимальный забор воды $Q_{макс}$ и средние за многолетие полезная отдача $Q_{пол}$, сбросы воды $Q_{сбр}$ и потери $Q_{пот}$ из водохранилищ Донбасса, млн. м³/мес.

$Q_{макс}$	$Q_{пол}$	$Q_{сбр}$	$Q_{пот}$	$Q_{макс}$: $Q_г$	$Q_{пол}$: $Q_г$
Старо-Крымское (α=0,72; Q_0=3,8; за период 1951—1964 гг.: приток $Q_{ср}$=4,14; фактическая отдача 2,85)					
6,0	3,51	0,17	0,44	2,47	1,44
5,0	3,46	0,21	0,45	2,06	1,42
4,0	3,21	0,46	0,45	1,64	1,32
2,43	$Q_г$=2,43	1,25	0,46	1,00	1,00
Ольховское (α=0,70; Q_0=2,38; за период 1945—1964 гг.: приток $Q_{ср}$=3,07, фактическая отдача 1,67)					
3,50	2,23	0,51	0,34	2,52	1,61
2,80	2,17	0,55	0,35	2,02	1,56
2,10	1,81	0,90	0,36	1,51	1,31
1,39	$Q_г$=1,39	1,32	0,36	1,00	1,00
Карловское (α=0,79; Q_0=1,24; за период 1945—1964 гг.: приток $Q_{ср}$=1,43, фактическая отдача 0,92)					
3,0	0,94	0,23	0,26	4,00	1,26
2,6	0,92	0,25	0,26	2,67	1,22
1,6	0,90	0,27	0,26	2,13	1,17
1,2	0,82	0,35	0,26	1,60	1,10
0,75	$Q_г$=0,75	0,42	0,26	1,00	1,00
Елизаветинское (α=0,50, Q_0=0,79; за период 1952—1963 гг.: приток $Q_{ср}$=0,94, фактическая отдача 0,42)					
3,0	0,764	0,083	0,09	9,10	2,32
2,0	0,721	0,126	0,09	6,07	2,18
1,5	0,677	0,170	0,09	4,55	2,05
1,0	0,615	0,232	0,09	3,03	1,86
0,66	0,507	0,340	0,09	2,00	1,54
0,33	$Q_г$=0,33	0,517	0,09	1,00	1,00
Исаковское (α=0,58, Q_0=2,37; за период 1953—1964 гг.: приток $Q_{ср}$=4,82, фактическая отдача 1,67)					
4,0	2,62	1,91	0,29	2,90	1,90
3,0	2,37	2,15	0,29	2,17	1,72
2,0	1,79	2,73	0,29	1,45	1,30
1,38	$Q_г$=1,38	3,15	0,29	1,00	1,00

Примечание. Таблица составлена по результатам расчетов О. В. Котова.

Ход зависимости переменной полезной отдачи от производительности водозабора (рис. 63) уже сам по себе говорит о многом. Судя только по ходу этой зависимости, максимальный забор воды, например, из Старо-Крымского водохранилища не должен превышать 4,5—5,0 м³/с.

Однако эти пределы производительности водозабора должны быть подтверждены технико-экономическими расчетами (с учетом капиталовложений и эксплуатационных расходов для вариантов приращений — ступеней отдачи на графике) по конкретной системе сооружений.

Полученная на основе диспетчерского регулирования и расчета максимальная производительность системы принимается за окончательную, если не требуется изменение ее по специальным условиям.

Таким образом, диспетчерское регулирование стока является надежной основой для полной характеристики режима работы водохранилища, а значит и для объективного экономического обоснования размеров основных водопроводных сооружений. (Обычно они назначались в отрыве от возможного приращения средней за многолетие отдачи, зависящей от производительности водозабора и зарегулированности стока водохранилищем.) Поэтому диспетчерское регулирование стока следует признать обязательным в эксплуатации установок и при проектировании комплекса упомянутых устройств, технологически связанных с водохранилищем.

Применение графиков должно контролироваться водохозяйственным органом, а нарушение их при серьезных обстоятельствах следует отмечать соответствующим актом — разрешением на отклонение от правил с указанием соответствующего режима при этом.

Пример построения диспетчерского графика

Пусть за длительный ряд наблюдений получены следующие обобщенные характеристики стока: норма стока $Q_0 = 111$ м³/с, $Г_0 = 3{,}50$ км³, $C_{vг} = 0{,}35$; средний сток половодья (март—май) $П_0 = 2{,}33$ км³, $C_{vв} = 0{,}46$; средний сток межени (июнь—февраль) $М_0 = 1{,}17$ км³, $C_{vм} = 0{,}45$; средний сток зимнего квартала (декабрь—февраль) 0,48 км³, $C_{vз} = 0{,}58$.

Равномерная в течение года гарантированная отдача брутто $Q_г = 55{,}5$ м³/с, или $А_м = 1{,}31$ км³, $А_в = 0{,}44$ км³, $А_г = 1{,}75$ км³. Коэффициент регулирования $\alpha = 0{,}5$, максимальная производительность установки $Q_{пр} = 210$ м³/с. Обеспеченность гарантированной отдачи $P = 95\%$. Потери воды из водохранилища для упрощения не учитываем.

1. Определяем полезную емкость водохранилища. По статистическим характеристикам стока за весенний и меженный сезоны и за год находим соответственные объемы стока для $P = 95\%$: $П_P = 0{,}89$ км³; $М_P = 0{,}46$ км³; $Г_P = 1{,}77$ км³. Поскольку $М_P + П_P =$

$=1{,}35$ км$^3 < A_{бр} = 1{,}75$ км$^3 < Г_P = 1{,}77$ км^3, то полезная емкость определяется по стоку межени расчетной обеспеченности $M_P = 0{,}46$ км^3. К этой величине близки данные следующих лет из наличного периода наблюдений:

Год	1939–40	1920–21	1930–31	1921–22	1938–39
Объем стока межени, млн. м^3	717	687	584	492	465
Коэффициент приводки к M_P . .	0,642	0,67	0,787	0,935	0,988

По месячным расходам межени этих лет после их приводки к расчетной межени (умножением на соответствующие коэффициенты) определяются объемы водохранилища (табл. 35) для 1920-21 г.

Таблица 35

Расчет емкости водохранилища

Год	Месяц	Декада	Средний расход воды по данным наблюдений, м^3/с	Приведенный расход воды, м^3/с	Недостаток расхода воды до величины $Q_г$, м^3/с	Объем воды, взятой из водохранилища, 10^6 м^3
1920	Май	III	40,2	26,9	28,6	27,2
	Июнь	—	31,4	21,0	34,5	89,5
	Июль	—	32,7	21,9	33,6	90,1
	Август	—	30,5	20,4	35,1	94,1
	Сентябрь	—	22,1	14,8	40,7	105
	Октябрь	—	21,7	14,5	41,0	110
	Ноябрь	—	24,3	16,3	39,2	102
	Декабрь	—	23,5	15,7	39,8	107
1921	Январь	—	45,8	30,6	24,9	66,8
	Февраль	—	30,1	20,1	35,4	85,6
	Март	I	24,9	16,7	38,8	33,5
					Сумма	911

Примечание. Коэффициент приводки $\frac{0{,}46}{0{,}687} = 0{,}67$.

На основании аналогичных расчетов для нескольких лет полезная емкость водохранилища принята равной 0,92 км^3.

Стоку межени в жестких границах (июнь—февраль) соответствует емкость $A_м - M_P = 1{,}31 - 0{,}46 = 0{,}85$ км^3. Как видно, поправка, вводимая для удовлетворения водопотребителей при удлинении межени (случай раннего окончания предшествующего половодья и позднего начала последующего), равна 0,07 км^3.

2. Расчеты для противоперебойной линии. Так как $M_Р+П_Р<A_{бр}<Г_Р$, то расчетный сток половодья находим по формуле (55)

$$П=П_Р+(П_0-П_Р)\frac{A_{бр}-(M_Р+П_Р)}{Г_0-(M_Р+П_Р)}=$$

$$=0{,}89+(2{,}33-0{,}89)\frac{1{,}75-(0{,}46+0{,}89)}{3{,}50-(0{,}46+0{,}89)}=1{,}16\ км^3.$$

При этом допустимая сработка к началу половодья $W_д=П-A_в=1{,}16-0{,}44=0{,}72$ км³, а расчетный сток межени (в жестких границах) $M=A_м-W_д=1{,}31-0{,}72=0{,}59$ км³.

Отметим, что расчетный сток межени больше обеспеченного стока межени ($M_Р$) на $0{,}59-0{,}46=0{,}13$ км³. Уменьшение объема $W_д$ на эту величину рассчитано на возможное незаполнение водохранилища маловодными половодьями. Кроме того, на случай растянутой межени потребовалось 0,07 км³ воды. Значит объем воды, задерживаемой в водохранилище к 1/III (из расчета для межени в жестких границах, т. е. если начало ее будет 1/VI), составляет 0,20 км³.

Кривые сработки противоперебойной линии строятся по нескольким маловодным меженным сезонам, близким по объему стока к расчетной величине $M=0{,}59$ км³. Такими оказались 1939-40, 1921-22, 1920-21 гг. и др.

По расходам этих меженных сезонов после их приводки к расчетной межени (умножением на соответствующие коэффициенты) определяются ординаты кривых, т. е. полезные объемы воды в водохранилище, которые должны содержаться к началу каждого ме-

Таблица 36

Расчет к построению кривой сработки противоперебойной линии

Год	Месяц	Декада	Средний расход воды по данным наблюдений, м³/с	Приведенный расход воды, м³/с	Недостаток расхода воды до величины $Q_г$, м³/с	Объем воды, взятой из водохранилища, 10^6 м³	Запас воды, требующийся к началу месяца (декады), 10^6 м³
1920	Май	III	40,2	34,7	20,8	19,8	765
	Июнь	—	31,4	27,1	28,4	73,7	745
	Июль	—	32,7	28,2	27,3	73,1	672
	Август	—	30,5	26,3	29,2	78,2	599
	Сентябрь	—	22,1	19,1	36,4	94,3	520
	Октябрь	—	21,7	18,7	36,8	98,6	426
	Ноябрь	—	24,3	21,0	34,5	89,4	327
	Декабрь	—	23,5	20,3	35,2	94,3	238
1921	Январь	—	45,8	39,5	16,0	42,9	144
	Февраль	—	30,1	26,0	29,5	71,4	101
	Март	I	24,9	21,5	34,0	29,4	29

Примечание. Коэффициент приводки $\frac{0{,}592}{0{,}687}=0{,}863$.

сяца (декады), чтобы сработка к концу межени не превысила величины, допустимой без нарушения гарантийности водоотдачи.

Порядок расчета для межени 1920-21 г. показан в табл. 36. По данным последней графы с дополнением мертвого объема наносится кривая на график, на котором совмещаются кривые всех лет отобранной группы. По наиболее высоким участкам линии проводится верхняя огибающая, которая и принимается за ветвь противоперебойной линии.

Приводка стока отобранных меженных сезонов, не совпадающих по срокам с жесткими границами этого сезона (июнь—февраль), производилась по расчетному меженному стоку (0,59 км³), который в предыдущих расчетах связан с жесткими границами сезонов (через величины $A_м$, $A_в$ и $П$). Поэтому, несмотря на то что огибающая кривая распространяется за пределы жестких границ межени, она охватывает только объем в этих границах, который равен 0,72 км³. Полученная по расчету добавка 0,07 км³ для растянутой межени не будет охвачена, в связи с чем вся ветвь сработки при нанесении ее на диспетчерский график должна быть повышена так, чтобы верхняя точка ветви совместилась с НПГ.

В табл. 37 приведены полезные объемы ветви сработки противоперебойной линии.

Таблица 37

Ординаты ветви сработки противоперебойной линии (в начале интервала, млн. м³)

Декада мая			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	Декада марта		
1-я	2-я	3-я										1-я	2-я	3-я
920 *	920 **	920	920	832	747	667	577	485	400	330	260	200	140 ***	80 ***

* Начало половодья с 1/III.
** Начало половодья с 10/III.
*** Ординаты для марта на диспетчерском графике принимаются в увязке с ветвями наполнения.

Для ветви наполнения противоперебойной линии применяется скользящая шкала времени. Половодья с объемом, близким к расчетному ($П = 1{,}16$ км³), разделены на ранние (с началом подъема уровня во второй декаде марта) и поздние (с началом подъема в третьей декаде марта); самое раннее начало подъема — первая декада марта, самое позднее — первая декада апреля. Эти случаи для построения огибающих не учитываются, как очень редкие, но полученные огибающие затем смещаются для учета крайних дат.

Характеристики некоторых из половодий приведены в табл. 38. Расчеты выполнены и кривые построены по всем отобранным половодьям. В табл. 39 приведен расчет для половодья 1928 г.

Таблица 38

Характеристики половодий

	Раннее половодье			Позднее половодье		
	1921	1927	1934	1930	1905	1928
Наблюденный объем стока половодья, км³	1,007	2,096	1,523	0,869	1,898	1,913
Коэффициент приводки	1,150	0,553	0,759	1,332	0,611	0,605
Декада и месяц начала подъема	2-я декада марта			3-я декада марта		

Таблица 39

Расчет к построению кривой наполнения противоперебойной линии

Декада от начала половодья (скользящая шкала времени)	Интервал времени (декады) по ходу половодья 1928 г.		Наблюденный среднедекадный расход воды, м³/с	Приведенный среднедекадный расход воды, м³/с	Превышение расхода воды над величиной $Q_г$, м³/с	Накопление воды за декаду, 10^6 м³	Допустимая величина незаполненной емкости к началу декады, 10^6 м³
	месяц	декада					
1-я	Март	III	78,2	47	—8,5	—7,5	824
2	Апрель	I	614	372	316,5	274	824
3		II	532	322	266,5	230	550
4		III	568	344	288,5	249	320
5	Май	I	209	126	70,5	61	71
6		II	111	67	11,5	10	10
7		III	84,2	51	—4,5	—4	0

Примечание. Коэффициент приводки $\frac{1,158}{1,913} = 0,605$.

Те вёсны, за которыми следует многоводная летняя межень с расходами более гарантированных, при построении кривых наполнения интереса не представляют, так как опасность незаполнения водохранилища из-за раннего окончания половодья отпадает.

Данные последнего столбца таблицы с дополнением мертвого объема наносятся в виде кривой на график, на котором приведены кривые для поздних половодий, и проводится верхняя огибающая, приуроченная внизу к 20/III. Такой же вариант ветви для учета самых поздних половодий получается смещением к 1/IV построенной ветви.

Аналогично строится огибающая для ранних половодий, приуроченных внизу к 10/III с ее вариантом, смещенным к 1/III для охвата самых ранних половодий.

Допустимые наличные объемы для ветвей наполнения противоперебойной линии приведены в табл. 40.

Таблица 40

Необходимые наличные объемы водохранилища по ветвям наполнения противоперебойной линии, 10^6 м³

Декада от начала подъема (скользящая шкала времени)	Вариант начала подъема по календарю					
	I декада марта			II декада марта		
	месяц	декада	объем воды к началу декады	месяц	декада	объем воды к началу декады
1	Март	I	200	Март	II	183
2		II	407		III	407
3		III	703	Апрель	I	703
4	Апрель	I	832		II	832
5		II	882		III	882
6		III	907	Май	I	907
7	Май	I	920		II	920
8		II	—		III	—
9		III	—			

Декада от начала подъема (скользящая шкала времени)	Вариант начала подъема по календарю					
	III декада марта			I декада апреля		
	месяц	декада	объем воды к началу декады	месяц	декада	объем воды к началу декады
1	Март	III	167	Апрель	I	150
2	Апрель	I	400		II	390
3		II	692		III	680
4		III	832	Май	I	820
5	Май	I	882		II	870
6		II	907		III	907
7		III	920	Июнь	I	920
8						
9						

3. Противосбросовая линия строится для обеспеченности $100 - 95 = 5\%$. Объем половодья $П_{5\%} = 4{,}31$ км³. Диспетчерская сработка равна 0,72 км³.

При производительности установки 210 м³/с за три месяца весны будет использовано и задержано $\frac{210 \cdot 91 \cdot 86\,400}{10^9} + 0{,}72 =$ $= 2{,}37$ км³ воды, т. е. на 1,94 км³ меньше объема расчетного половодья; этот избыток пойдет на сброс. Значит, ветвь наполнения противосбросовой линии пройдет ниже ветви наполнения противоперебойной линии. Поэтому рассчитаем лишь ветвь сработки водохранилища к раннему началу половодья, т. е. к 1/III, до уровня

противоперебойной линии на ту же дату (0,92 — 0,72 = 0,20 км³). Начиная с этого объема, находим предельно высокие наполнения, соответствующие минимуму сбросов воды.

Объем стока многоводной зимы с обеспеченностью 5% равен 1,017 км³. К этому близок сток зим 1902-03, 1919-20, 1947-48 гг. и др. По стоку отобранных зим, приведенному к объему 1,017 км³, строятся ходом назад кривые опорожнения, нижняя огибающая которых, смещенная вверх на величину мертвого объема, принимается за ветвь сработки противосбросовой линии.

Таблица 41

Расчет к построению кривой сработки противосбросовой линии

Средний наблюденный расход воды, м³/с	Приведенный расход воды, м³/с	Избыток производительности установки, м³/с	Объем, опорожняемый за месяц, 10⁶ м³	Объем к началу месяца, который может быть опорожнен до 1/III, 10⁶ м³	Наибольший допустимый запас воды в водохранилище на начало месяца, 10⁶ м³
		Декабрь 1902 г.			
51,6	68,5	141,5	380	644	844
		Январь 1903 г.			
110	146	64,0	171	264	464
		Февраль 1903 г.			
130	171,5	38,5	93	93	293
		Март 1903 г.			
—	—	—	—	0	200

Примечание. Коэффициент приводки $\frac{1,017}{0,766} = 1,328$.

В табл. 41 приведен пример расчета кривой сработки по стоку зимы 1902-03 г., а координаты кривой даны в табл. 42.

Таблица 42

Полезные объемы водохранилища, не создающие угрозы излишних сбросов (ветвь сработки противосбросовой линии), 10⁶ м³

25/XI	1/XII	1/I	1/II	1/III
920	844	464	293	200

4. Линии ограничения отдачи построены для выделения зоны с расходами 80 и 60% гарантированной отдачи, чему соответствуют

44,4 и 33,3 м³/с. Зона первого понижения (44,4 м³/с) условно начинается 1/IX, т. е. после того как за лето наметится тенденция к маловодности межени, зона второго понижения (33,3 м³/с) — 1/XII, т. е. после того как выяснится отсутствие осенних паводков.

Расчет к построению ограничительных линий показан на примере маловодной межени 1920-21 г. в табл. 43. В той же таблице (в графах 10 и 11) даны наполнения водохранилища (кроме мерт-

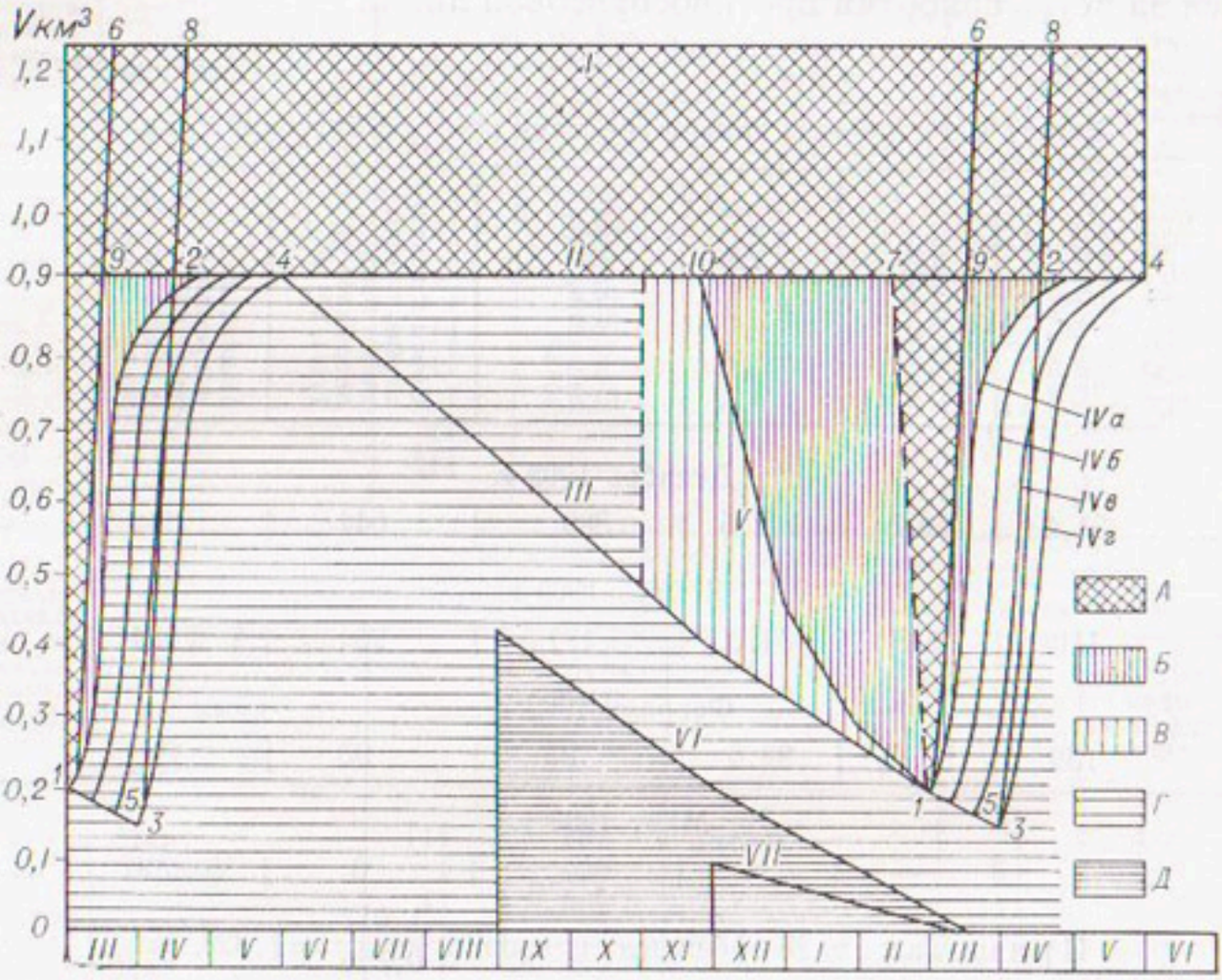


Рис. 64. Диспетчерский график с полным комплексом его элементов.

I — уровень форсировки (МПГ), *II* — наполненное водохранилище (НПГ), *III* — противоперебойная линия, ветвь сработки, *IVа* — противоперебойная линия, ветвь наполнения при начале половодья 1/III; *IVб*, *IVв*, *IVг* — то же соответственно 10/III, 20/III, 1/IV; *V* — противосбросовая линия, *VI* — ограничение отдачи до 80%; *VII* — то же до 60%; *А* — зона холостых сбросов; *Б* — зона полной производительности установки; *В* — зона повышенной отдачи; *Г* — зона гарантированной отдачи; *Д* — зона ограничений.

вых объемов) по верхним огибающим, полученным для нескольких кривых и принятым за линии ограничения.

Построение диспетчерского графика в целом показано на рис. 64.

Для плана регулирования стока условно принято, что до 1/XI избытки воды (между ветвями противоперебойной и противосбросовой линий) не расходуются. С 1/XI по 1/III избытки срабатываются по возможности равномерно. В начале каждого месяца назначается на весь месяц расход, равный гарантированному

Расчет к построению кривых пониженной (урезанной) отдачи

Месяц	Декада	Приведенный расход воды, средний за интервал времени, м³/с	Расход воды, недостающий (—) или избыточный (+) при отдаче $0{,}8Q_г$, м³/с	Объем воды, расходуемый (—) из водохранилища или накапливаемый (+) в нем, 10^6 м³	Необходимый запас воды к началу интервала при отдаче $0{,}8Q_г$, 10^6 м³	Расход воды, недостающий (—) или избыточный (+) при отдаче $0{,}6Q_г$, м³/с	Объем воды, расходуемый (—) из водохранилища или накапливаемый (+) в нем, 10^6 м³	Необходимый запас воды к началу интервала при отдаче $0{,}6Q_г$, 10^6 м³	Запас полезной емкости к началу интервала по линиям пониженной отдачи, 10^6 м³	
									при расходе воды 44,4 м³/с	при расходе воды 33,3 м³/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Сентябрь	I — III	14,8	—29,6	—76,6	427	—	—	—	430	—
Октябрь	I — III	14,5	—29,9	—80,1	350	—	—	—	350	—
Ноябрь	I — III	16,3	—28,1	—72,8	270	—	—	—	275	—
Декабрь	I — III	15,7	—28,7	—76,8	197	—17,6	—47,2	100	200	100
Январь	I — III	30,6	—13,8	—37,0	120	—2,7	—7,2	53	150	75
Февраль	I — III	20,1	—24,3	—58,6	83	—13,2	—31,9	46	90	46
Март	I	16,7	—27,7	—24,0	24	—16,6	—14,3	14,3	36	18
„	II	—	—	—	—	—	—	—	17	8
„	III	—	—	—	—	—	—	—	0	0

плюс добавка от деления избыточной емкости в начале месяца на число секунд от этого начала до конца межени, т. е. до 1/III. В начале следующего месяца снова назначается расход на весь месяц с определением новой добавки и т. д.

§ 21. УЧЕТ СЛУЧАЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СТОКА ДЛЯ ОРОШЕНИЯ

Роль асинхронности вегетационных осадков и речного стока при его регулировании для орошения

В настоящее время «оросительная способность» рек в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения (юго-запад СССР) определяется для той же заданной обеспеченности $P = 80 \div 95\%$, которая принимается и для осадков. Однако, если проследить хронологический ряд величин стока и осадков за вегетацию в упомянутой зоне, то обнаружим, что в одном и том же году эти составляющие запаса влаги не совпадают по обеспеченности, т. е. асинхронны [81].

Учет асинхронности засухи и водности рек равноценен выявлению «скрытых водных резервов» при орошении. Попытаемся рассмотреть теоретическую и практическую сущность затронутого вопроса.

Величина упомянутых резервов влаги в связи с учетом явления асинхронности определяется в следующем порядке.

В статистическую обработку за многолетний период (N лет) включаются сезонные (за вегетацию) или годовые объемы стока вместе с объемами эффективных, т. е. впитываемых вегетационных, различных в каждом году осадков, приходящихся на площадь $\omega_P = W_{QP} : M_0$, где W_{QP} — речной сток той же обеспеченности, которая принята и для осадков; ω_P — обеспеченная площадь орошения; M_0 — оросительная норма, соответствующая осадкам заданной обеспеченности H_P и принимаемая осредненно для всей отводимой под орошение площади. Согласно работе И. Н. Длотовского (1965), для названной выше зоны можно принять следующие примерные оросительные нормы, соответствующие разным обеспеченностям осадков и связанным с ними агрометеорологическим условиям: $M_{75} = 3500$, $M_{80} = 3700$, $M_{90} = 4000$, $M_{95} = 4500$ м³/га.

Так как при выявлении асинхронности вегетационных осадков и стока рассматривается весь речной сток W_{QP}, то и осадки должны учитываться со всей площади ω_P.

Перебои водообеспечения возникают прежде всего в годы, засушливые по осадкам и маловодные по стоку. Следовательно, при отборе перебойных лет речь может идти о годах, имеющих суммарный запас влаги (речного стока и эффективных осадков), соответствующий обеспеченности более расчетной, и составляющих число перебойных лет n, допустимое для заданной обеспеченности $n = 0{,}01\ (100 - P)N$.

Метеостанции для оценки осадков должны:

1) располагаться в зоне предполагаемого орошения;

2) иметь период наблюдений, хронологически совпадающий и близкий по продолжительности к периоду гидрометрических наблюдений в гидростворе;

3) достаточно равномерно покрывать площадь обеспеченного орошения ω_P.

Объем эффективных, т. е. впитываемых вегетационных осадков равен:

для заданной обеспеченности $W_{hP} = 10\eta H_P \omega_P$,

для каждого года $W_{hi} = 10\eta H_i \omega_P$,

где H_P, H_i — осадки за период вегетации, обеспеченные и за каждый год ряда, мм; η — коэффициент впитывания осадков.

По данным Московского института инженеров водного хозяйства, в настоящей работе приняты следующие коэффициенты η для периода вегетации по Украине (кроме Прикарпатья и Закарпатья).

Обеспеченность вегетационных осадков, %	$\leqslant 10$	25	50	75	$\geqslant 95$
Коэффициент впитывания, η	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80

В результате расчетов общий объем влаги для орошения равен: для заданной обеспеченности

$$W_P = W_{QP} + W_{hP}, \tag{59}$$

для каждого года

$$W_i = W_{Qi} + W_{hi}. \tag{59'}$$

Надо отметить, что распределение осадков за время вегетации на юго-западе СССР обычно неравномерное. Однако в засушливые годы оно редко бывает таким, чтобы выпавшие осадки оказались малополезными, незаменяющими собой соответствующую часть объема влаги для орошения в формуле (59).

Малополезными осадки бывают:

1) при переувлажненной почве, т. е. при обильном и длительном выпадении дождей. Такие случаи не могут относиться к годам, в которые важно знать объем влаги от осадков, заменяющих собой соответствующую часть влаги, восполняемой из реки (аналогия с мощностями ГЭС, вытесняющими в маловодном году тепловые мощности энергосистемы, см. § 33);

2) при кратковременном и обильном выпадении осадков. В рассматриваемом районе осадки бывают в виде ливней. Однако такие суммы осадков за один ливень (например, 60—80 мм и более), которые превышали бы количество влаги, необходимое для одного полива, бывают очень редко. Имея в виду не ограниченные приовражные зоны с повышенными уклонами, а в целом широкие плоские степные пространства, можно считать, что неравномерность выпадения осадков не теряет за собой заменяющей

роли при назначении дополнительной влаги из внешних источников, что известно из многолетней сельскохозяйственной практики.

Из осторожности, частичное снижение заменяющей роли осадков при увеличении их количества учитывается данными для коэффициентов впитывания.

Осадки могут оказаться бесполезными, если они значительны и выпадают сразу же после полива. Однако такое совпадение событий не может считаться обычной ситуацией. Оно возможно в виде исключения (при современном краткосрочном гидрометеорологическом обслуживании).

Такова сущность обоснований к учету обеспеченных осадков в формуле (59) при проектировании орошения в рассматриваемой зоне.

Поскольку W_{QP} учитывается при этом с той же обеспеченностью, что и осадки, то величину W_P можно принять за исходную для расчета коэффициента асинхронности K. Ожидаемое увеличение располагаемых ресурсов влаги от W_P до искомых W_x, могущее произойти за счет асинхронности осадков и стока, следует отнести, понятно, к стоку.

Исходя из изложенного и в соответствии с формулой (59), напишем:

$$W_x = KW_{QP} + W_{hP},$$

или

$$K = (W_x - W_{hP}) : W_{QP}. \qquad (60)$$

Отсюда следует, что коэффициент асинхронности — это коэффициент увеличения обеспеченного стока за время вегетации (или годовой отдачи водохранилища) до величины, которая в сумме с обеспеченными эффективными осадками за вегетацию дает располагаемый обеспеченный объем влаги для орошения.

Величина W_x принимается такой, чтобы допустимое число перебойных лет n с суммарным количеством влаги $W_i \leqslant W_x$ соответствовало заданной обеспеченности орошения влагой.

Так, если длительность ряда $N = 60$ лет, то при $P = 90\%$ $n = 0{,}01\,(100 - P)\,N = 0{,}01\,(100 - 90) \cdot 60 = 6$ годам.

При сезонном и годовом регулировании установленное число перебойных лет n в ряду величин W_i, расположенных в убывающем порядке, отсчитывается снизу (см. последнюю графу в табл. 44). Ближайший больший, т. е. следующий в этом отсчете член ряда, и есть искомая величина W_x, а значение K определяется по зависимости (60).

При многолетнем регулировании такой отсчет наименьших членов ряда неприемлем. Число перебойных лет при некотором K — множителе для отдачи A, которая принимается вместо W_{QP} (формула 60), подсчитывается выборкой из всего ряда. Значение K, соответствующее установленному n, находится подбором, причем для каждого K заново выполняется многолетнее регулирование стока по всему ряду с подсчетом перебойных лет, как показано

Таблица 44

Определение коэффициента асинхронности суммарных осадков за май—сентябрь и средних расходов воды р. Днепра у г. Верхнеднепровска за то же время для обеспеченности $P=90\%$, $C_v=0{,}39$, $Q_{ср}=1880$ м³/с, $W_{QP}=13{,}4$ км³, $M_0=4000$ м³/га, $\omega_P=3{,}35\cdot10^6$ га, $H_P=159$ мм, $W_{hP}=10\cdot0{,}75\cdot159\cdot3{,}35\cdot10^6=4{,}0$ км³, $W_P=13{,}4+4{,}00=17{,}4$ км³, $N=71$, $n=0{,}01(100-90)\cdot71=7$

Год	Объем стока за май — сентябрь W_{Qi} км³	Осадки за май — сентябрь, мм		Объем эффективных осадков W_{hi} км³	$W_i=W_{Qi}+W_{hi}$ км³	W_i в убывающем порядке	
		общие H_i	эффективные h_i			год	объем, км³
1904	15,5	125	100	3,35	18,85	1920	20,16
1920	15,1	252	151	5,06	20,16	1910	19,96
1954	14,7	194	134	4,49	19,19	1954	19,19
1910	14,6	276	160	5,36	19,96	1904	18,85
1939	13,8	192	133	4,45	18,25	1930	18,80
1930	13,6	268	155	5,20	18,80	1939	18,25
1950	13,1	174	125	4,19	17,29	1950	17,29
1960	10,3	303	167	5,70	16,00	1960	16,00
1961	10,1	205	137	4,59	14,69	1961	14,69
1921	9,11	169	123	4,12	13,23	1921	13,23

$K=(19{,}19-4{,}00):13{,}4=1{,}13$, $n=7$.

в табл. 45. (Приводится для краткости с исключением почти всех лет, обеспечивающих объем влаги W_x и заполнение водохранилища.)

Многолетняя составляющая общего объема водохранилища, которая при регулировании по целым годам понимается как полезная емкость, определялась по графикам автора.

В результате речной сток, располагаемый для орошения при заданной обеспеченности, равен $W=KW_{QP}$.

При использовании для орошения части располагаемого стока его величина составит $W=K\gamma W_{QP}$, где γ — доля обеспеченного стока, выделенная для орошения.

Таким образом, приращение располагаемых водных ресурсов по сравнению с обеспеченным объемом стока определится по формуле

$$\Delta W=(K-1)\gamma W_{QP}.$$

В первом примере (табл. 44) располагаемый объем стока для орошения равен $W=KW_{90}=1{,}13\cdot13{,}4=15{,}13$ км³, а дополнительный объем, кроме обеспеченного, составляет $(1{,}13—1)\cdot13{,}4=1{,}74$ км³.

Если сток за время вегетации используется на орошение частично ($\gamma=0{,}1\div0{,}2$), т. е. орошается не $3{,}35\cdot10^6$ га, а только 335—670 тыс. га, то располагаемый сток равен $K\gamma W_{90}=1{,}5\div3{,}0$ км³ (вместо обеспеченного $\gamma W_{QP}=1{,}34\div2{,}68$ км³), а дополнительный объем от эффекта асинхронности составит $\Delta W=0{,}17\div0{,}34$ км³.

Определение коэффициента асинхронности суммарных осадков за май—сентябрь и годовых объемов стока воды р. Днепра у г. Верхнеднепровска для обеспеченности $P=95\%$, $C_v=0{,}25$, $\Gamma_0=49{,}2$ км³, $\alpha=0{,}70$, $\beta_м=0{,}08$, $V_м=4{,}0$ км³, $A=34{,}4$ км³/год, $M_0=4500$ м³/га, $\omega_P=7{,}64\cdot10^6$ га, $H_P=128$ мм, $\eta=0{,}80$, $W_{hP}=10\cdot0{,}80\cdot128\cdot7{,}64\cdot10^6=7{,}82$ км³, $W_P=A+W_{hP}=34{,}4+7{,}82=42{,}22$ км³, $N=74$ года, $n=0{,}01(100-95)\cdot74=3{,}7$, т. е. $n=3\div4$. Расчет для $K=1{,}13$, $W_x=1{,}13\cdot34{,}4+7{,}82=46{,}75$ км³

Год	Начальный объем водохранилища, км³	Поступило влаги, км³		Конечный объем, км³	Сброс, км³	Дефицит (перебой), км³
		W_{Qi}	W_{hi}			
1901	4,00	39,1	10,2	4,00	2,55	—
1904	4,00	32,2	7,64	0	—	2,91
1910	4,00	34,7	10,8	2,75	—	—
1911	2,75	38,5	10,9	4,00	1,40	—
1921	4,00	21,7	8,41	0	—	12,64
1925	4,00	26,2	14,6	0	—	1,95
1949	4,00	39,7	10,7	4,00	3,65	—
1950	4,00	34,4	9,17	0,82	—	—
1954	4,00	27,5	9,17	0	—	6,08
1959	4,00	41,6	9,10	4,00	3,95	—
1960	4,00	30,9	12,2	0,35	—	—
1961	0,35	36,3	10,1	0	—	—

При $K=1{,}05\div1{,}07$ $W_x=43{,}85\div44{,}75$ км³, $n=3$.
При $K=1{,}08\div1{,}13$ $W_x=45{,}00\div46{,}75$ км³, $n=4$.

Если вместо сезонного (за май—сентябрь) применяется полное годовое регулирование, то для того же примера $K_{90}=1{,}07$ и располагаемый объем стока $W=1{,}07\cdot34{,}3=36{,}8$ км³, а дополнительный объем при использовании всего стока на орошение равен $\Delta W=(1{,}07-1)\cdot34{,}3=2{,}4$ км³.

При $\gamma=0{,}2$ ($\omega_P=0{,}2\cdot8{,}6\cdot10^6=1{,}72\cdot10^6$ га), $\Delta W=0{,}48$ км³.

Небольшая для р. Днепра величина коэффициента K и слабое влияние на него годового и многолетнего регулирования стока объясняется, с одной стороны, тем, что изменчивость стока невелика ($C_v=0{,}25$); с другой стороны, вегетационные осадки, определяемые по каждому году для громадной площади орошения, т. е. осредненно по 20—30 пунктам, также отличаются небольшой изменчивостью, меньшей, чем для небольшой площади ω_P, осадки для которой учитываются по 2—3 метеостанциям.

Для бассейна р. Дона K несколько выше, чем для р. Днепра.

С уменьшением речного бассейна и с повышением обеспеченности осадков и стока коэффициент асинхронности K возрастает.

Для бассейна Южного Буга ($F=46\,200$ км², $C_v=0{,}38$, $Q_{ср}=82{,}9$ м³/с) значение K при $P=95\%$ составляет: при годовом регулировании 1,12, при многолетнем (для $\alpha=0{,}75$) 1,17—1,23.

Расчеты годового и многолетнего регулирования стока при $P=95\%$ показывают, что величина K для малых рек (со значитель-

ной изменчивостью их годового стока и осадков на небольшой площади) увеличивается до 1,30.

Наряду с приведенным выше приемом расчета K по длительным рядам, который содержит недостатки, свойственные всем эмпирическим расчетам, можно использовать также и другие приемы.

Так, величина K может быть определена при помощи построения кривой обеспеченности объемов влаги W_i по соответствующим статистическим параметрам ($\overline{W_i}$, C_v, C_s). Ту же кривую можно построить методом сложения кривых обеспеченности эффективных осадков (W_{hi}) и речного стока (W_{Qi}). Затем по кривой обеспеченности величин W_i определяется значение W_x и по формуле (60) — коэффициент K. Окончательное значение K принимается по совокупности полученных данных.

Таким образом, асинхронность вегетационных осадков и стока в засушливые годы представляет интерес только как соотношение между располагаемым для орошения маловодным стоком в упомянутые годы и стоком той же обеспеченности $P\%$, которая принимается в орошении для осадков. Коэффициент асинхронности дает искомую количественную характеристику рассматриваемого явления.

При прочих равных физико-географических условиях приращение располагаемого стока ΔW_{QP} возрастает:

1) при повышении обеспеченности влаги для орошения;

2) при повышении изменчивости и уменьшении обеспеченного притока (то и другое соответствует уменьшению речных бассейнов);

3) при повышении зарегулированности стока (в большинстве случаев). Правда, при сезонном регулировании величина K наибольшая, но она относится только к части годового стока и дает обычно меньшую располагаемую добавку ΔW_{QP}, чем при годовом и многолетнем регулировании, при которых множитель K относится ко всей годовой отдаче водоема.

Поэтому оценку эффекта асинхронности следует производить по абсолютному приращению располагаемого стока ΔW_{QP}.

Расчеты, выполненные Н. И. Сепита и Н. З. Гелеверя, дают следующее. Обеспеченный годовой сток по основным рекам юго-запада СССР (табл. 46) равен $W^{\text{г}}_{90-95} = 56 \div 50$ км³. При использовании его на орошение приращение $\Delta W^{\text{г}}_{90-95} = 5{,}0 \div 5{,}2$ км³.

Использование половины обеспеченного стока за вегетацию на поливы ($\gamma = 0{,}5$) при оросительных нормах для указанных обеспеченностей $M_0 = 4000$ м³/га и $M_0 = 4500$ м³/га позволит оросить из названных рек площадь $\omega^{\text{г}}_{90-95} = 7{,}0 \div 5{,}5$ млн. га, причем располагаемые приращения стока за счет асинхронности с осадками составят $\Delta W^{\text{г}}_{90-95} = 2{,}5 \div 2{,}6$ км³.

Обеспеченный сезонный сток за вегетацию равен $W^{\text{с}}_{90-95} = 22{,}1 \div 18{,}4$ км³, приращение $\Delta W^{\text{с}}_{90-95} = 2{,}6 \div 2{,}75$ км³; площадь

Таблица 46

Обеспеченные объемы стока W_{QP} и приращения располагаемого стока ΔW_{QP} (км³) по бассейнам рек юго-запада СССР при использовании всего обеспеченного стока для орошения. K — осредненные коэффициенты асинхронности вегетационных осадков и стока

Река — пункт	$P = 90\%$						$P = 95\%$					
	Сезонное регулирование			Годовое регулирование			Сезонное регулирование			Годовое регулирование		
	W_{QP}	K	ΔW_{QP}	W_{QP}	K	ΔW_{QP}	W_{QP}	K	ΔW_{QP}	W_{QP}	K	ΔW_{QP}
1. Днестр — Бендеры	2,09	1,11	0,23	5,96	1,08	0,48	1,74	1,12	0,21	5,27	1,09	0,47
2. Южный Буг — Александровка	0,35	1,12	0,04	1,45	1,08	0,12	0,29	1,14	0,04	1,23	1,12	0,15
3. Днепр — Верхнеднепровск	13,4	1,12	1,61	34,3	1,08	2,72	11,4	1,15	1,71	31,0	1,10	3,00
4. Северский Донец — Белая Калитва	0,45	1,22	0,10	2,30	1,10	0,23	0,37	1,32	0,12	1,90	1,20	0,38
5. Дон — Хованский	2,67	1,25	0,67	9,52	1,06	0,57	2,05	1,27	0,55	8,23	1,13	1,07
6. Дон — Раздорская	6,17	1,12	0,74	14,2	1,12	1,70	4,96	1,16	0,79	12,1	1,13	1,57
Σ 1, 2, 3, 4, 5	19,0		2,65	53,4		4,12	15,9		2,63	47,6		5,07
Σ 1, 2, 3, 6	22,1		2,62	55,9		5,02	18,4		2,75	49,6		5,19

Примечание. Сезонным регулированием здесь обозначено регулирование стока за период вегетации, годовым — полное годовое регулирование стока для орошения.

орошения при использовании половины стока $(\gamma=0{,}5)w^{c}_{90-95}=$ $=2{,}75\div2{,}0$ млн. га, причем $\Delta W^{c}_{90-95}=1{,}3\div1{,}4$ км³.

Располагаемое приращение стока дает возможность дополнительно расширить орошаемые площади или соответственно учесть его при оценке объема стока северных рек, необходимого для переброски на юг и юго-запад страны.

О регулировании стока на переменные оросительные нормы

Приемы расчета регулирования стока на переменные оросительные нормы в зоне недостаточного или неустойчивого увлажнения рассматривались еще в 30-х годах В. В. Трофимовым, а затем были развиты М. В. Потаповым [91].

В. В. Трофимов предложил многолетнюю часть емкости водохранилища для орошения определять по формуле, аналогичной уравнению (33′′′),

$$\beta_{м}=\left(\bar{\alpha}K^{(n)}_{\alpha}-K^{(n)}_{P}\right)n,$$

считая в ней модульные коэффициенты отдачи $K^{(n)}_{\alpha}$ относящимися к обеспеченности $100-P\%$.

Для расчета требуется ряд величин α за несколько лет, для которого определяются среднее значение отдачи $\bar{\alpha}$, коэффициент ее изменчивости по годам, модульные коэффициенты $K^{(n)}_{\alpha}$, и т. п. Здесь также за расчетный принимается тот период лет n, который дает наибольшую величину $\beta_{м}$.

М. В. Потапов для расчета емкости $\beta_{м}$ предложил использовать прием построения кривой обеспеченности дефицита по кривым обеспеченности отдачи α и стока K (в форме построения квадрата вероятностей), дающий точное решение при отсутствии и наличии корреляционной связи между K и α, обобщаемой уравнением регрессии.

При этом выявляются величины дефицита, соответствующие разным обеспеченностям для 1-леток, 2-леток, 3-леток и т. д. Наибольшее значение дефицита заданной обеспеченности принимается за искомую емкость [91].

Однако впредь до накопления рядов оросительного водопотребления, фактического или теоретического, рассматриваемая задача остается разрешимой по указанным приемам лишь в методическом смысле.

Создание теоретических рядов оросительного водопотребления — наиболее легкий путь практического решения задачи. Но при этом необходимо сначала обработать гидрологические и климатические данные и создать по конкретным зонам методику установления оросительных норм, позволяющую надежно расширить информацию о водопотреблении для орошения за достаточно большой ряд лет. Затем для расчетов здесь также может быть использован метод Монте-Карло (см. § 11).

Глава VIII

РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА НА ДВЕ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Расчет водохранилищ на совмещенное использование их при различной обеспеченности водой двух потребителей широко применяется в проектировании. Этот вопрос освещен в работе Д. В. Коренистова и В. Р. Казака «Номографический расчет водохранилищ, обслуживающих с различной степенью обеспеченности промышленное водоснабжение и ирригацию», выполненной в 1946 г. под руководством С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля. В § 22—24 кратко излагаются результаты этой работы. В § 25 приведены соображения о расчете водохранилища при любом режиме отдачи на две обеспеченности водопотребления.

§ 22. ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для решения вопросов совмещенного водообеспечения ирригации и предприятий (или населенных пунктов) и при построении соответствующих расчетных номограмм приняты следующие исходные положения:

1. Водоснабжение является постоянным по годам и равномерным в течение года, а удовлетворяется с обеспеченностью $P=97\%$.

2. Орошение рассчитывается на равномерное водопотребление в течение пяти месяцев (май—сентябрь) и как водопотребитель, менее чувствительный к изменениям водоподачи, нормально удовлетворяется водой в пределах 75% лет при постоянном за вегетацию объеме водоподачи, соответствующем некоторым средним нормам полива [1]; для обеспеченностей 75—97% подача воды на ирригацию снижается и составляет 0,80 расчетной (нормальной).

3. Распределение воды между водоснабжением и ирригацией за пределами 97%-ной обеспеченности не освещается.

4. Изменчивость годового стока характеризуется коэффициентом от $C_{vr}=0{,}40$ до $C_{vr}=0{,}70$ при $C_s=2C_{vr}$; внутригодовое распределение стока на весну (март—апрель, 55%) и на межень (май—февраль, 45%) принято постоянным и соответствует схеме, приве-

[1] В действительности водозабор на единицу площади в известных пределах колеблется по годам в зависимости от засушливости (или влажности) вегетационного сезона. Однако принятая схематизация подачи воды на ирригацию не нарушает результатов, что подтверждено расчетом по фактическому ряду лет.

денной в табл. 47 и приемлемой с достаточным приближением для большинства малых и средних рек средней полосы ЕТС, Украины и других районов нашей страны.

Таблица 47

Внутригодовое распределение стока (%), принятое при номографировании

III			IV			V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	Год
декада																
I	II	III	I	II	III											
5	18	12	9	6	5	7,7	6,3	4,9	3,2	2,7	3,6	4,1	4,0	4,0	4,5	100

Допущение о постоянстве внутригодового распределения стока для всех лет соответствует одинаковым коэффициентам вариации годового, половодного и меженного объемов стока, т. е. при этом считается, что между объемами половодного и меженного стока существует функциональная зависимость (или коэффициент корреляции $r' = 1{,}0$). Однако упомянутое допущение, как и некоторые из вышеприведенных, необходимое в условиях весьма сложных расчетов, оправдывается тем, что возникающая при этом погрешность невелика, что видно из сопоставления объемов водохранилища, по-

Таблица 48

Сравнение емкостей $\beta_п$ при $r' = 1{,}0$ и $r' = 0$

Характеристика	Вариант расчета	
	I	II
Исходные параметры стока		
Коэффициент изменчивости стока:		
годового	0,50	0,50
половодного	0,50	0,75
меженного	0,50	0,50
Меженный сток в долях от годового	0,45	0,45
Коэффициент корреляции между объемами стока половодья и межени (r')	1,0	0,0
Емкости водохранилища $\beta_п$ при $P = 97\%$		
$\alpha = 0{,}50$	0,36	0,35
$\alpha = 0{,}60$	0,53	0,51
$\alpha = 0{,}70$	0,86	0,83

Примечание. При разных r' коэффициент вариации половодья во втором варианте увеличен для соблюдения одинаковой обеспеченности отдачи (см. § 13).

лученного по двум вариантам расчета: для $r'=1$ и $r'=0$ при одинаковой изменчивости годового стока $C_r=0{,}50$ (табл. 48).

5. Допускалось, что связь между объемами стока смежных лет отсутствует ($r=0$). При этих условиях необходимо:

а) определить полезную емкость водохранилища $\beta_п$, достаточную для покрытия отдачи на водоснабжение $\alpha_в$ и ирригацию $\alpha_и$ при заданных параметрах стока;

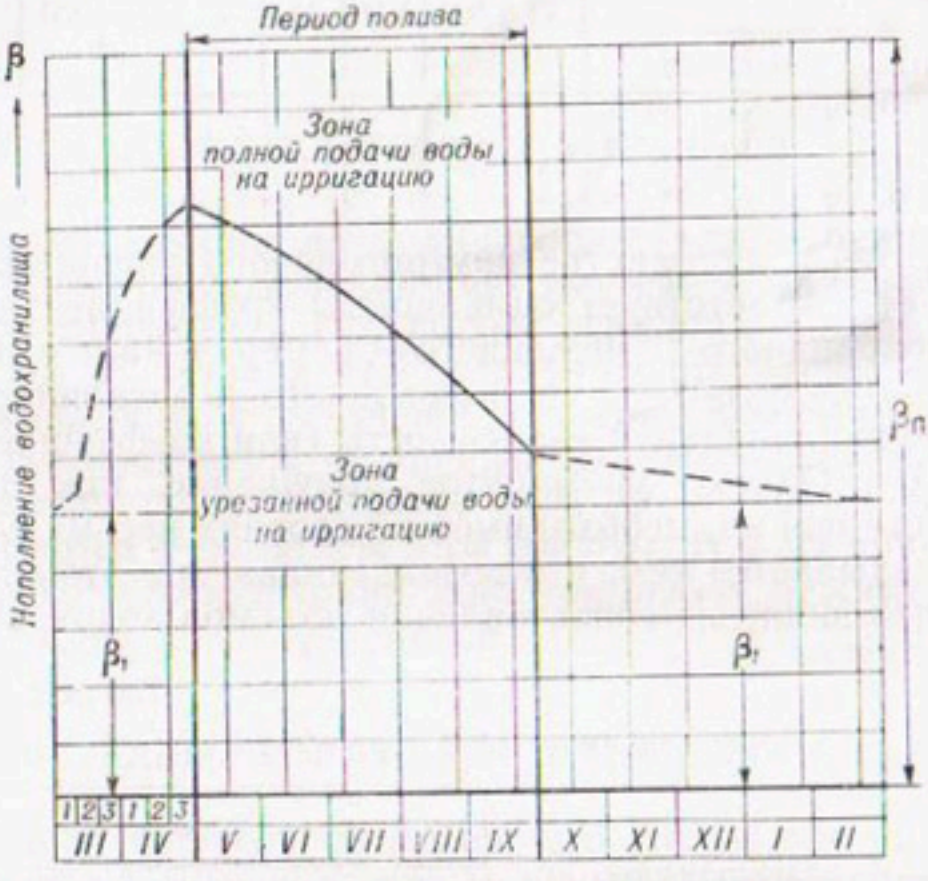


Рис. 65. Схема диспетчерского графика работы водохранилища, обслуживающего двух потребителей с различной степенью обеспеченности.

На водоснабжение в течение всего года подается постоянный расход независимо от наполнения водохранилища.

б) определить отдачу $\alpha_в$ и $\alpha_и$ при заданных размерах водохранилища и заданных параметрах стока;

в) составить диспетчерскую схему работы водохранилища для соблюдения его проектного режима (условия удовлетворения нормальной отдачи, порядок перехода к пониженной отдаче на ирригацию $\alpha_{и.п}$, возвращение от пониженной к нормальной, допустимая предполоводная сработка $\beta_{сраб}=\beta_п-\beta_1$ с оставлением на начало весны многолетней диспетчерской емкости β_1 и т. п.).

Расчет опорных точек номограмм произведен по обобщенному методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля 1940 г. [61].

Решение весьма осложнилось при удовлетворении разнообеспеченных отдач ($P_1=97\%$, $P_2=75\%$). Переход от нормальной отдачи на орошение к пониженной и обратно определялся в зависимости от наполнения водохранилища, для чего по каждой опорной точке требовалось построение диспетчерского графика работы водохранилища $\beta=\varphi(t)$ (рис. 65).

Параллельное смещение на графике раздельной линии вверх или вниз изменяет обеспеченность как нормальной, так и пониженной отдачи, даже если рабочая емкость в целом остается постоянной. Чтобы найти емкость $\beta_п$ для заданных $\alpha_в$ и $\alpha_н$ с обеспеченностями P_1 и P_2, необходимо было установить также положение диспетчерской линии (ординату β_1 на рис. 65), т. е. сделать двойной подбор — по $\beta_п$ и β_1.

Система расчетов сводилась к следующему:

1. При некоторых значениях $\beta_п$ и β_1 строился диспетчерский график работы водохранилища. Очертание линии, разделяющей зоны нормальной $\alpha_{н.\,н}$ и пониженной $\alpha_{н.\,п}$ подачи воды на орошение, устанавливалось внутригодовым регулированием стока по году с модульным коэффициентом $K=\alpha_{с.\,п}$ (здесь $\alpha_{с.\,п}$ — суммарная пониженная отдача водохранилища, равная $\alpha_в+0{,}8\alpha_{н.\,н}$, т. е. учитывающая пониженную отдачу на ирригацию, причем общая обеспеченность отдачи $\alpha_{с.\,п}$ равна $P=97\%$).

2. По полученному диспетчерскому графику проводилась серия расчетов внутригодового регулирования стока для лет различной водности, т. е. по годам с обеспеченностью стока $P_г$, равной 1, 5, 10, 20, 30, 50, 70, 80, 90, 95 и 99% (при необходимости число расчетных лет увеличивалось). При объеме, меньшем, чем по линии диспетчера, принималась суммарная пониженная отдача $\alpha_{с.\,п}=\alpha_в+0{,}8\alpha_{н.\,н}$, при большем объеме — суммарная нормальная отдача $\alpha_{с.\,н}=\alpha_в+\alpha_{н.\,н}$, т. е. $\alpha_{с.\,п}=\alpha_{в97}+\alpha_{н75}$ (числовые индексы при $\alpha_в$ и $\alpha_н$ указывают обеспеченность этих величин).

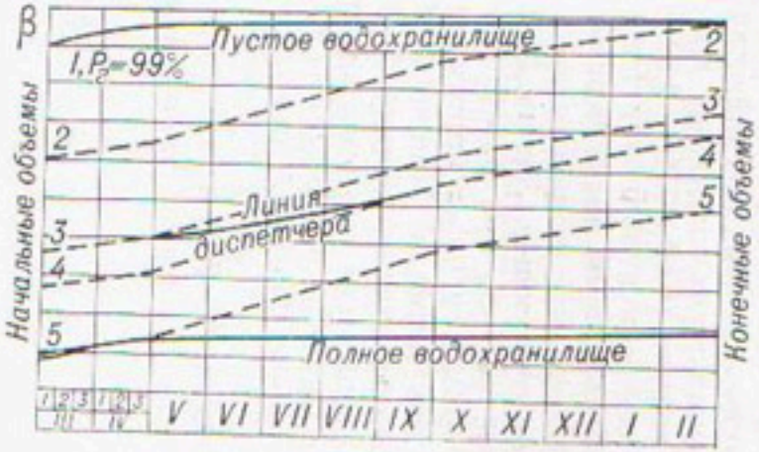
Цель расчетов состояла в том, чтобы для водохранилища с заданной емкостью $\beta_п$ найти конечные (к концу года) наполнения $\beta_к$ по начальному наполнению $\beta_н$ (к началу года) для всех выбранных лет с обеспеченностью стока $P_г$ (рис. 66).

Объясним кратко порядок расчета. На рис. 66 *I—V* в относительных величинах (в долях от $Г_0$) представлены интегральные кривые стока и отдачи (пунктир) для характерных по водности лет. Интегральная кривая стока показана вверху для пустого водохранилища и смещена на величину полезной емкости $\beta_п$ до полного водохранилища — внизу. Одно деление графика по вертикали соответствует 0,2. Так, для емкости $\beta_п=1{,}63$ требуется более восьми делений, для стока K_{50} — около пяти делений, при наполнении за период вегетации более диспетчерского годовая отдача при $\alpha_в=0{,}60$ и $\alpha_{н.\,н}=0{,}25$ займет $(0{,}60+0{,}25):0{,}20=4{,}25$ деления и $(0{,}60+0{,}8\cdot0{,}25):0{,}20=4$ деления при меньшем наполнении (следует помнить, что на рис. 66 *I—V* наполнение увеличивается вниз от диспетчерской линии).

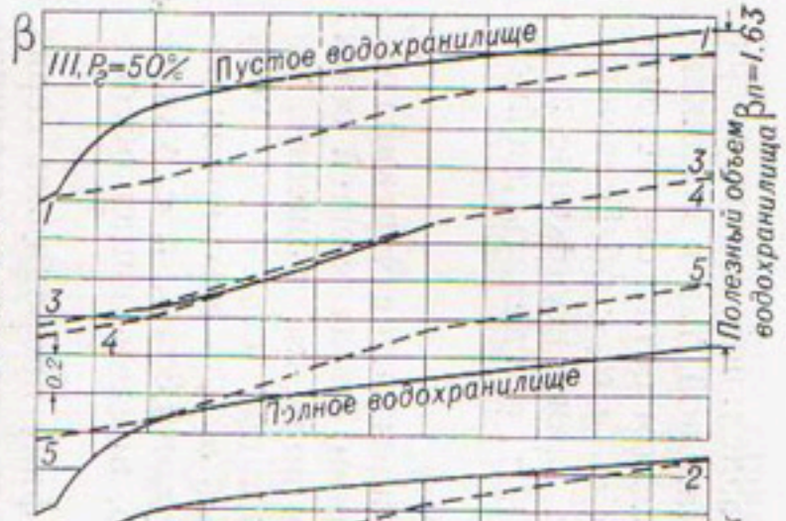
Кривые отдачи (пунктир на рис. 66 *I—V*) означают следующее. Линия *1—1* определяет значение $\beta_н$ при $\beta_п=0$. Линия *2—2* дает величину $\beta_н$ при $\beta_к=0$. Линия *3—3* показывает наибольшее значение $\beta_н$, при котором для нужд ирригации поступает пониженная норма в течение всего поливного периода. Линия *4—4* дает минимум $\beta_н$, обеспечивающий полную ирригационную отдачу. Линия *5—5* определяет наименьшую величину $\beta_н$, при которой $\beta_к$ достигает максимального в данном году значения. Эти линии отвечают переломным точкам вспомогательной номограммы $\beta_к=\varphi(\beta_н, P_г)$ на рис. 66 *VI*, для построения которой и выполнялись расчеты по п. 2.

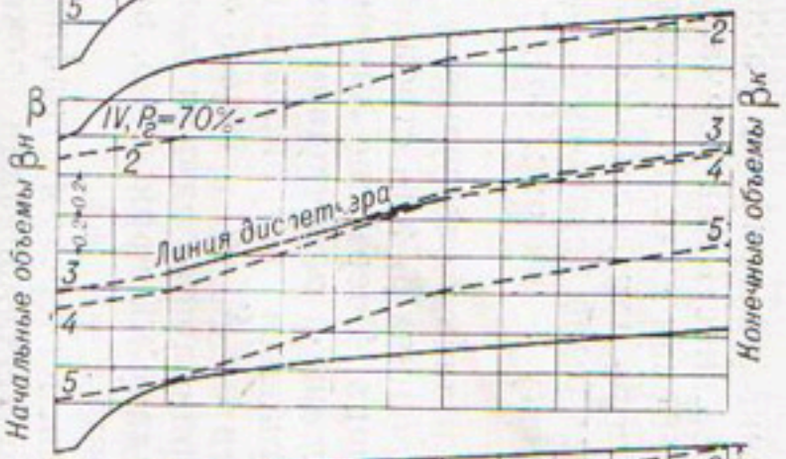
Соответствующие точки показаны на номограмме линии $P_г=70\%$.

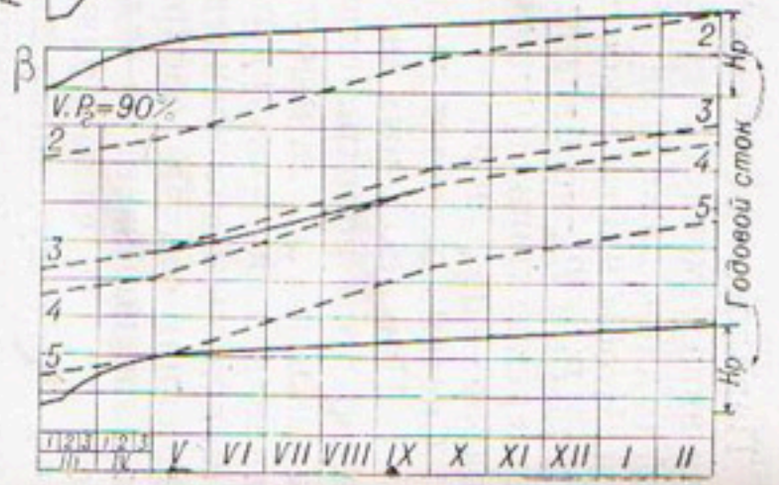
Кроме расчетов для построения рис. 66 *I—V*, проведены расчеты также для $P_г$, равных 1, 5, 10, 20, 30 и 80%.

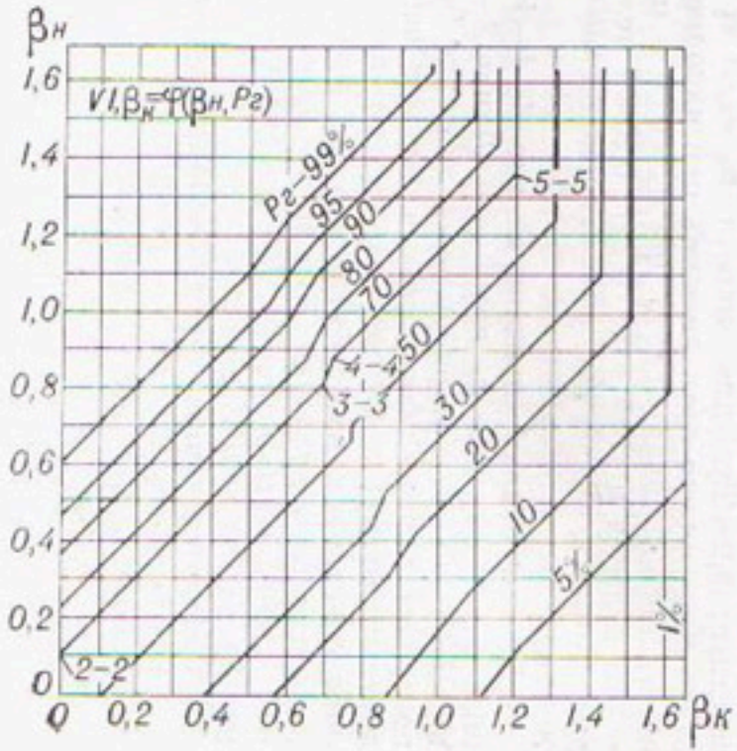

β
I, P_2=99%
Пустое водохранилище
Линия диспетчера
Полное водохранилище
Начальные объемы
Конечные объемы
V VI VII VIII IX X XI XII I II

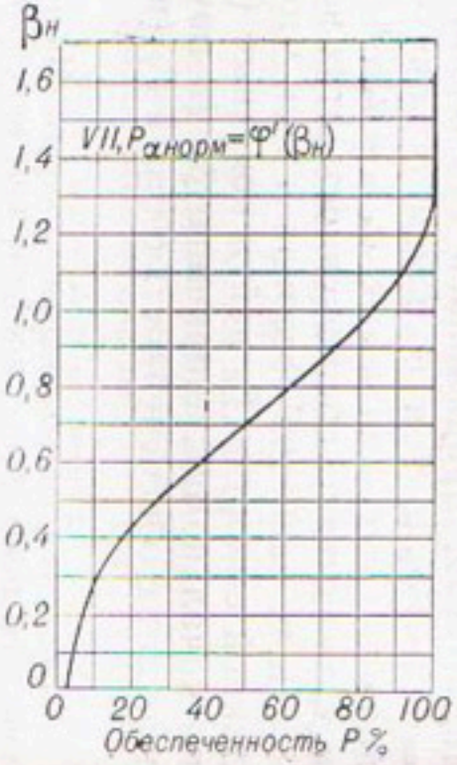

β
II, P_2=95%
Пустое водохранилище
Полное водохранилище
Год. отдача
V VI VII VIII IX X XI XII I II


β
III, P_2=50%
Пустое водохранилище
Полное водохранилище
Полезный объем водохранилища $\beta_п$=1.63


β
IV, P_2=70%
Линия диспетчера
Начальные объемы $\beta_н$
Конечные объемы $\beta_к$


β
V, P_2=90%
Годовой сток
Нр
V VI VII VIII IX X XI XII I II


$\beta_н$
VI, $\beta_к = \varphi(\beta_н, P_2)$
P_2=99%
95
90
80
70
50
30
20
10
5%
1%
5-5
4-4
3-3
2-2
0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 $\beta_к$


$\beta_н$
VII, $P_{\alpha норм} = \varphi'(\beta_н)$
0 20 40 60 80 100
Обеспеченность P%

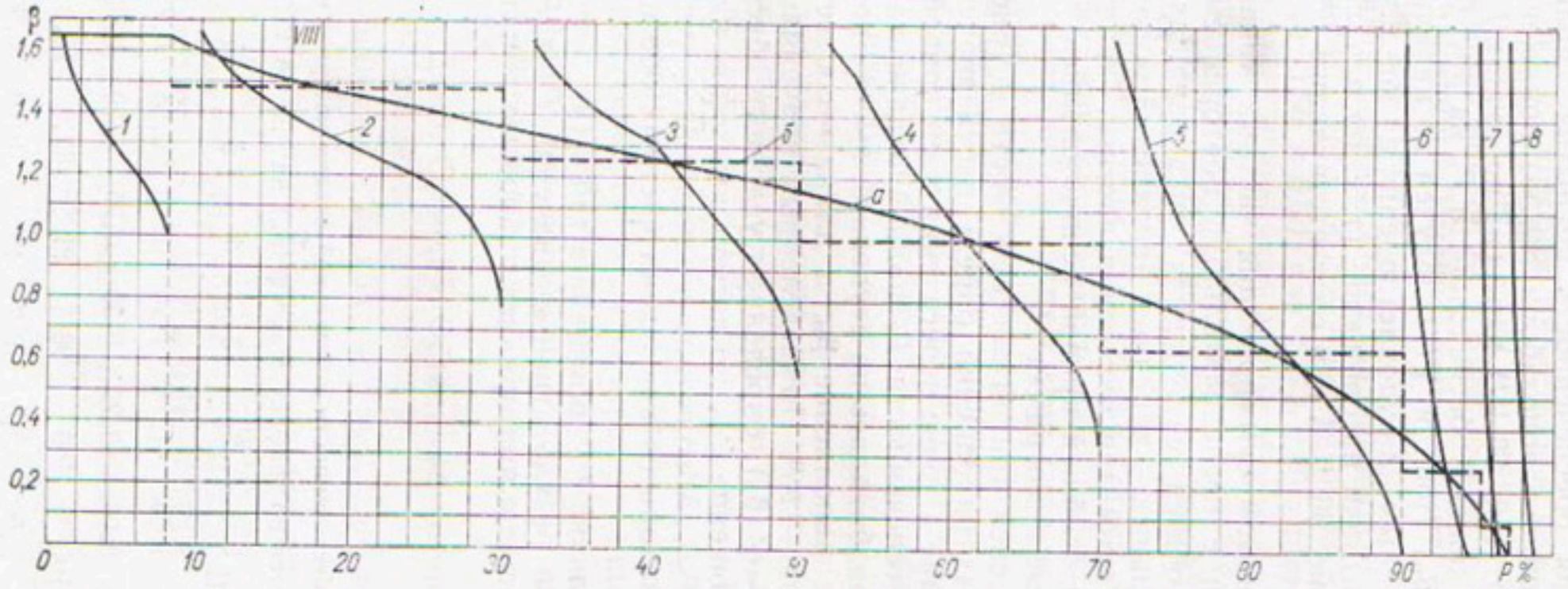


Рис. 66. Расчет опорной точки номограммы $\beta_н = \varphi(\alpha_в, \alpha_{н.п})$ при $C_v = 0{,}5$, $\alpha_в = 0{,}60$, $\alpha_{н.п} = 0{,}25$, $\beta_н = 1{,}63$, $\beta_1 = 0{,}75$.

I, II, III, IV, V — кривые регулирования стока характерных по водности лет [к построению номограммы $\beta_н = \varphi(\beta_н, P_г)$]; *VI* — номограмма зависимости $\beta_к = \varphi(\beta_н, P_г)$; *VII* — кривая обеспеченности нормальной отдачи $P_{\alpha_{норм}} = \varphi'(\beta_н)$; *VIII* — построение установившейся кривой обеспеченности начальных — конечных наполнений водохранилища; *1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8* — частные кривые обеспеченности конечных наполнений в интервале ΔP; *а* — установившаяся кривая обеспеченности начальных — конечных наполнений; *б* — среднее начальное наполнение в интервале ΔP.

3. На основании расчетов, изложенных в п. 2, строились вспомогательные номограммы $\beta_к = \varphi(\beta_н, P_г)$ и график $P_{\alpha н} = \varphi'(\beta_н)$ [здесь $P_{\alpha н}$ — условная обеспеченность покрытия полного (нормального) ирригационного водозабора $\alpha_н$ без понижения]. Номограмма $\beta_к = \varphi(\beta_н, P_г)$ (рис. 66 *VI*) нанесена по точкам *1—5* начальных объемов $\beta_н$ для каждой обеспеченности $P_г$ на рис. 66 *I—V*.

График $P_{\alpha н} = \varphi'(\beta_н)$ (рис. 66 *VII*) получен по начальным объемам, как раз достаточным для удовлетворения до конца оросительного сезона полной отдачи на орошение (т. е. по начальным объемам в точках *4* на рис. 66 *I—V*), и соответствующим обеспеченностям $P_г$.

4. Известным приемом суммирования частных кривых обеспеченности наполнений с последовательным повторением (приближением) строилась общая безусловная установившаяся кривая обеспеченности начальных — конечных наполнений водохранилища (рис. 66 *VIII*). При этом для нанесения частных кривых над отдельными ступенями *б* общей кривой использовались упомянутые выше вспомогательные номограммы.

5. По установившейся кривой обеспеченности *а* (рис. 66 *VIII*) начальных — конечных наполнений определялось значение P_1 отдачи на водоснабжение в точке пересечения этой кривой с осью P. Для определения обеспеченности P_2 полной отдачи на орошение упомянутая кривая разбивалась на ступени *б*, высота которых есть среднее начальное наполнение $\beta_н$, а длина — соответствующая доля всего многолетия — ΔP. По выделенным значениям $\beta_н$, пользуясь графиком $P_{\alpha н} = \varphi'(\beta_н)$, определяем условные обеспеченности полной отдачи на орошение $P_{\alpha н}$, по которым находим частные обеспеченности $p_2 = \Delta P P_{\alpha н}$. Абсолютная полная обеспеченность нормальной отдачи P_2 находится как сумма частных обеспеченностей $(\sum p_2)$.

Схема расчета величины P_2 пояснена в табл. 49.

При несовпадении результативных значений P_1 и P_2 с заданными (97 и 75%) расчеты повторялись полностью при других зна-

Таблица 49

Определение обеспеченности нормальной отдачи на орошение

[$P_{\alpha н}$ находится по графику $P_{\alpha н} = \varphi'(\beta_н)$ на рис. 66 *VII*]

Частные интервалы . .	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее начальное наполнение	1,65	1,48	1,25	1,00	0,65	0,27	0,09	0,00
ΔP	0,08	0,22	0,20	0,20	0,20	0,05	0,02	0,03
$P_{\alpha н}$	100	100	98,5	81,5	43,0	10,0	4,5	3,0
$p_2 = \Delta P P_{\alpha н}$	8,00	22,0	19,7	16,3	8,60	0,50	0,09	0,09

$P_2 = \sum p_2 = 75{,}28\%$; $P_1 = 97\%$ — по рис. 66 *VIII*

чениях $\beta_п$ и β_1. Расчет считался законченным, если полученное значение P_1 отличалось от заданного не более чем на 0,1%, а значение P_2 — не более чем на 0,5%.

Рисунок 66, на котором представлен ход вычислений одной точки, иллюстрирует лишь один из вариантов построений для искомого сочетания полной $\beta_п$ и многолетней диспетчерской β_1 емкостей водохранилища. Именно этот вариант удовлетворяет заданным значениям обеспеченностей P_1 и P_2.

Координаты опорных точек, определенные описанным выше путем, приведены в табл. 50 для трех значений коэффициента изменчивости [0,40, 0,50 и 0,60, для $C_{vг}=0{,}70$ характеристики получены ориентировочно, с использованием формулы (61)]. Полученные опорные точки для трех значений $C_{vг}$, а также результаты расчетов по формуле для $C_{vг}=0{,}70$ послужили основой для построения номограмм, приведенных на рис. 67—70.

Поскольку суммарная пониженная отдача равна $\alpha_{с.п}=\alpha_в+\alpha_{и.п}$, то пересечение кривых на номограммах происходит на строго определенных вертикалях, дающих сумму (или разность) для соответствующих отдач. Величинам отдач в точках их пересечения удовлетворяет показанная на оси ординат необходимая полезная емкость водохранилища $\beta_п$. Для получения полной (нормальной) отдачи $\alpha_{с.п}=\alpha_в+\alpha_{и.н}$ пониженную ирригационную отдачу по номограмме необходимо умножить на 1,25, т. е. $\alpha_{с.п}=\alpha_в+1{,}25\alpha_{и.п}$.

В пределах каждой номограммы, как и между ними (при промежуточных значениях $C_{vг}$), допускается интерполяция.

Пример 1. Дано: $C_v=0{,}50$, $C_s=2C_v$, $m=0{,}45$, $t_м=10$ мес., $\alpha_в=0{,}25$, $P_в=97\%$, $\beta_п=1{,}60$. Определить $\alpha_и$, если $P_и=75\%$.

На рис. 68 видно, что при заданной емкости с увеличением $\alpha_в$ медленно увеличивается $\alpha_{с.п}$ при одновременном уменьшении $\alpha_{и.п}$. Для заданных $\alpha_в$ и $\beta_п$ находим $\alpha_{и.п}=0{,}485$, чему соответствует $\alpha_{с.п}=0{,}735$. При этом нормальная отдача на ирригацию $\alpha_{и.н}=1{,}25\cdot 0{,}485=0{,}605$ и суммарная нормальная отдача $\alpha_{с.н}=0{,}25+0{,}605=0{,}855$.

Пример 2. Дано: $C_v=0{,}55$. Остальные условия и требования см. в предыдущем примере.

При заданных $\alpha_в$ и $\beta_п$ находим $\alpha_{и.п}$. По рис. 68 $\alpha_{и.п}=0{,}485$, по рис. 69 $\alpha_{и.п}=0{,}445$.

Поскольку заданный коэффициент вариации занимает среднее положение между C_v для двух используемых номограмм, то искомая отдача $\alpha_{и.п}=(0{,}485+0{,}445):2=0{,}465$. В результате $\alpha_{и.н}=1{,}25\cdot 0{,}465=0{,}58$; $\alpha_{с.п}=0{,}25+0{,}465=0{,}715$; $\alpha_{с.н}=0{,}25+0{,}58=0{,}83$.

Аналогично решаются задачи по определению полезной емкости для заданных размеров $\alpha_и$ и $\alpha_в$. Полный ответ дается в результате простых операций вместо многочисленных, трудоемких и сложных расчетов и построений для пробного решения (для одной пары $\beta_п$ и β_1).

Таблица 50

Координаты опорных точек для номограмм $\beta_п = \varphi(\alpha_в, \alpha_{и.п})$ при $C_v = \text{const}$

Характеристика обеспечиваемой на 97% суммарной пониженной отдачи $\alpha_{с.п}$			Потребная емкость водохранилища в долях среднего годового стока при					
	в том числе		$C_v = 0{,}40$		$C_v = 0{,}50$		$C_v = 0{,}60$	
всего $\alpha_{с.п}$	ирригация $\alpha_{и.п}$	водоснабжение $\alpha_в$	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1
0,8	0,8	0,0	—	—	3,10	0,78	—	—
0,8	0,6	0,2	2,00	0,50	2,50	0,70	2,95	0,80
0,8	0,4	0,4	—	—	2,00	0,75	—	—
0,8	0,3	0,5	1,30	0,54	—	—	—	—
0,8	0,2	0,6	—	—	1,65	0,75	—	—
0,8	0,0	0,8	0,93	0,00	1,30	0,00	1,71	0,00
0,7	0,3	0,4	0,80	0,32	—	—	1,30	0,62
0,6	0,6	0,0	0,75	0,17	0,94	0,27	—	—
0,6	0,4	0,2	—	—	0,75	0,29	—	—
0,6	0,3	0,3	—	—	—	—	0,84	0,43
0,6	0,2	0,4	—	—	0,60	0,27	—	—
0,6	0,0	0,6	0,37	0,00	0,53	0,00	0,73	0,00
0,4	0,4	0,0	0,32	0,00	0,39	0,05	—	—
0,4	0,2	0,2	0,19	0,00	0,25	0,06	—	—
0,4	0,0	0,4	0,16	0,00	0,21	0,00	0,28	0,00
0,3	0,3	0,0	0,20	0,00	0,23	0,00	—	—
0,3	0,2	0,1	0,14	0,00	0,17	0,00	—	—
0,3	0,1	0,2	0,09	0,00	0,14	0,00	—	—
0,3	0,0	0,3	0,08	0,00	0,12	0,00	—	—
0,2	0,2	0,0	0,10	0,00	0,13	0,00	0,15	0,00
0,2	0,1	0,1	0,05	0,00	0,07	0,00	0,09	0,00
0,2	0,0	0,2	0,02	0,00	0,04	0,00	0,07	0,00

Примечание. Для сокращения приведены только характеристики пониженной отдачи. Суммарная нормальная отдача $\alpha_{с.п} = \alpha_в + 1{,}25\alpha_{и.п}$.

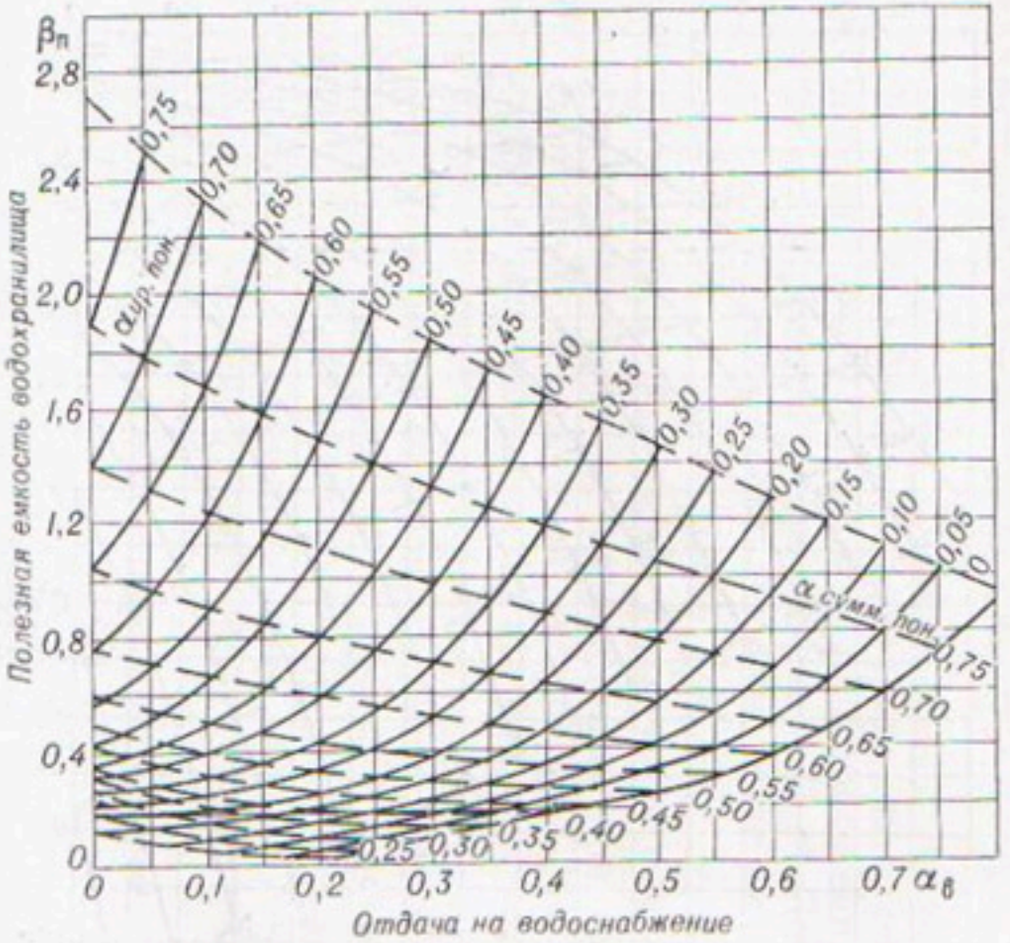


Рис. 67. Номограмма для расчета водохранилищ, работающих на водоснабжение и ирригацию при $C_{вг}=0{,}4$.

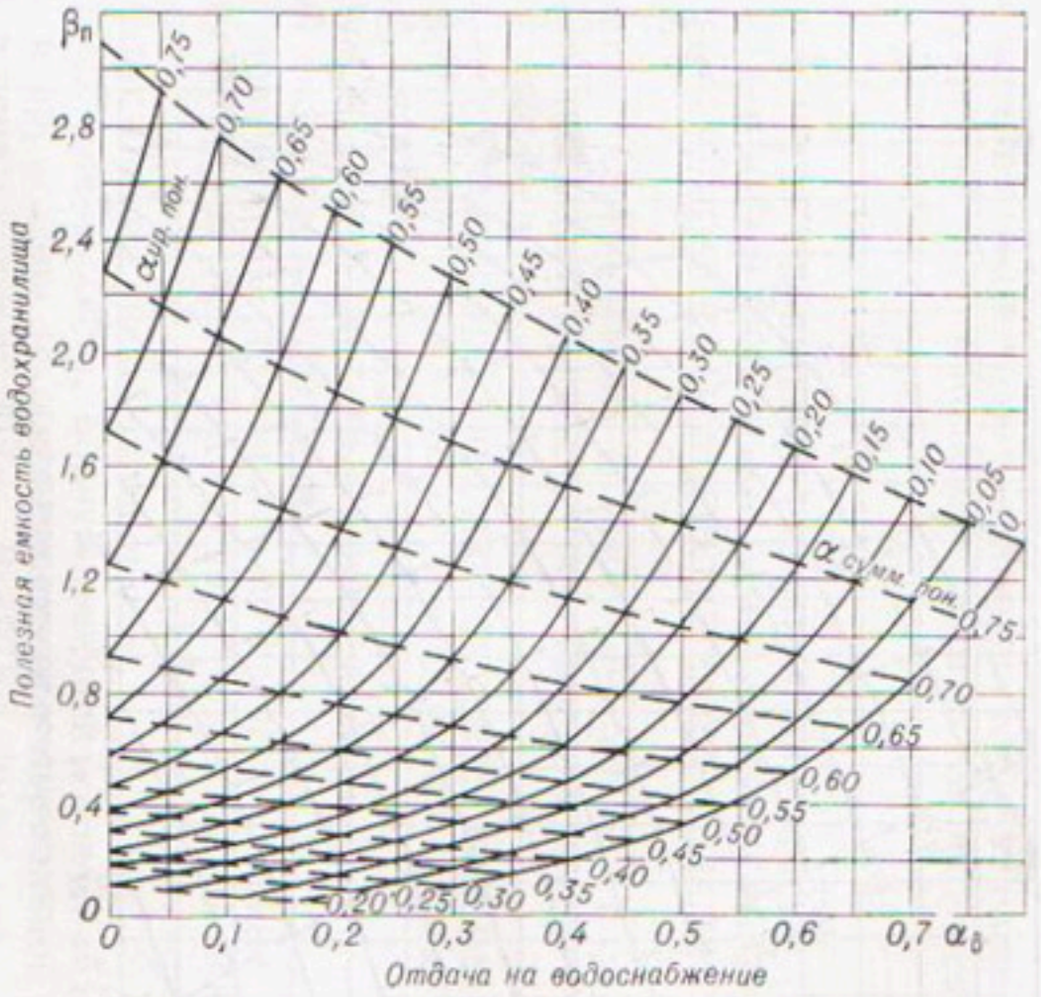


Рис. 68. Номограмма для расчета водохранилищ, работающих на водоснабжение и ирригацию при $C_{вг}=0{,}5$.

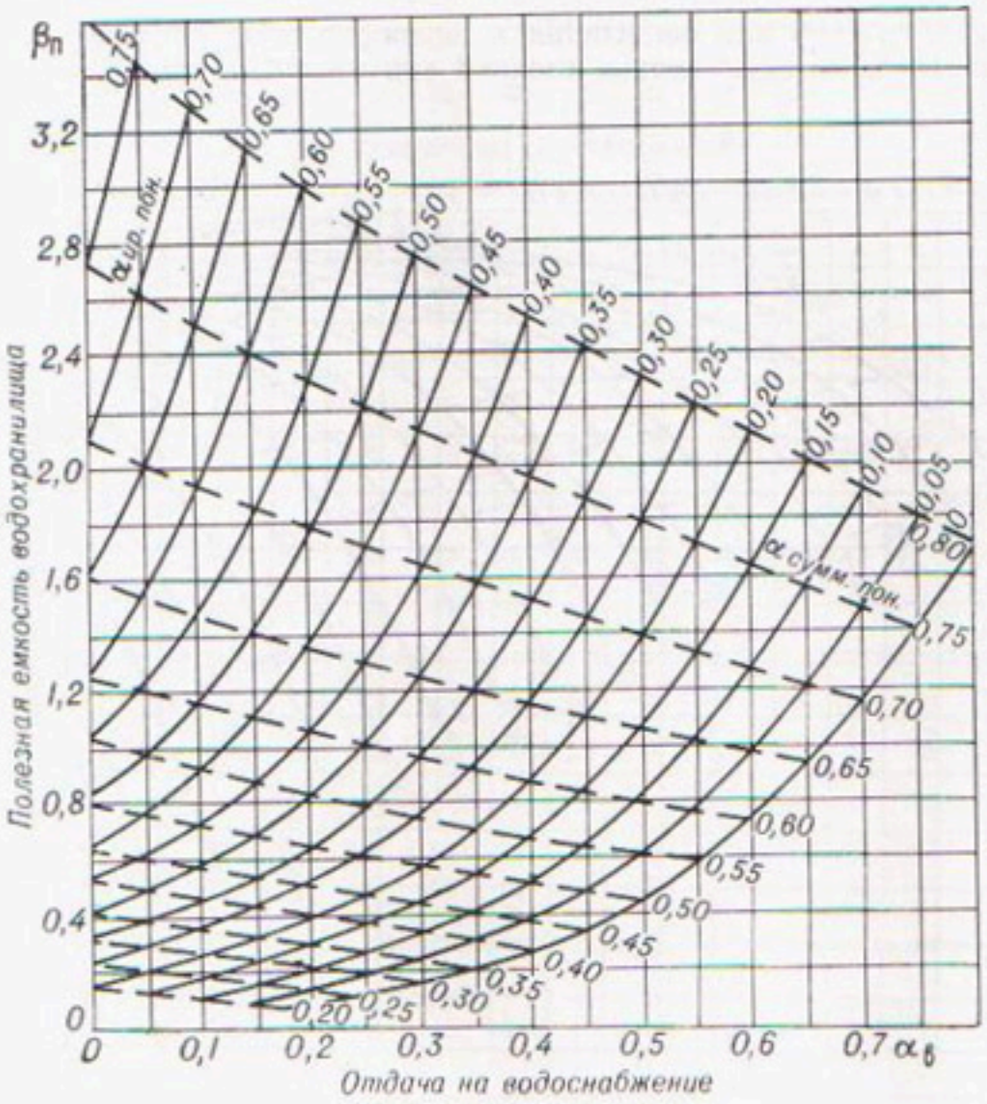


Рис. 69. Номограмма для расчета водохранилищ, работающих на водоснабжение и ирригацию при $C_{вг}=0{,}6$.

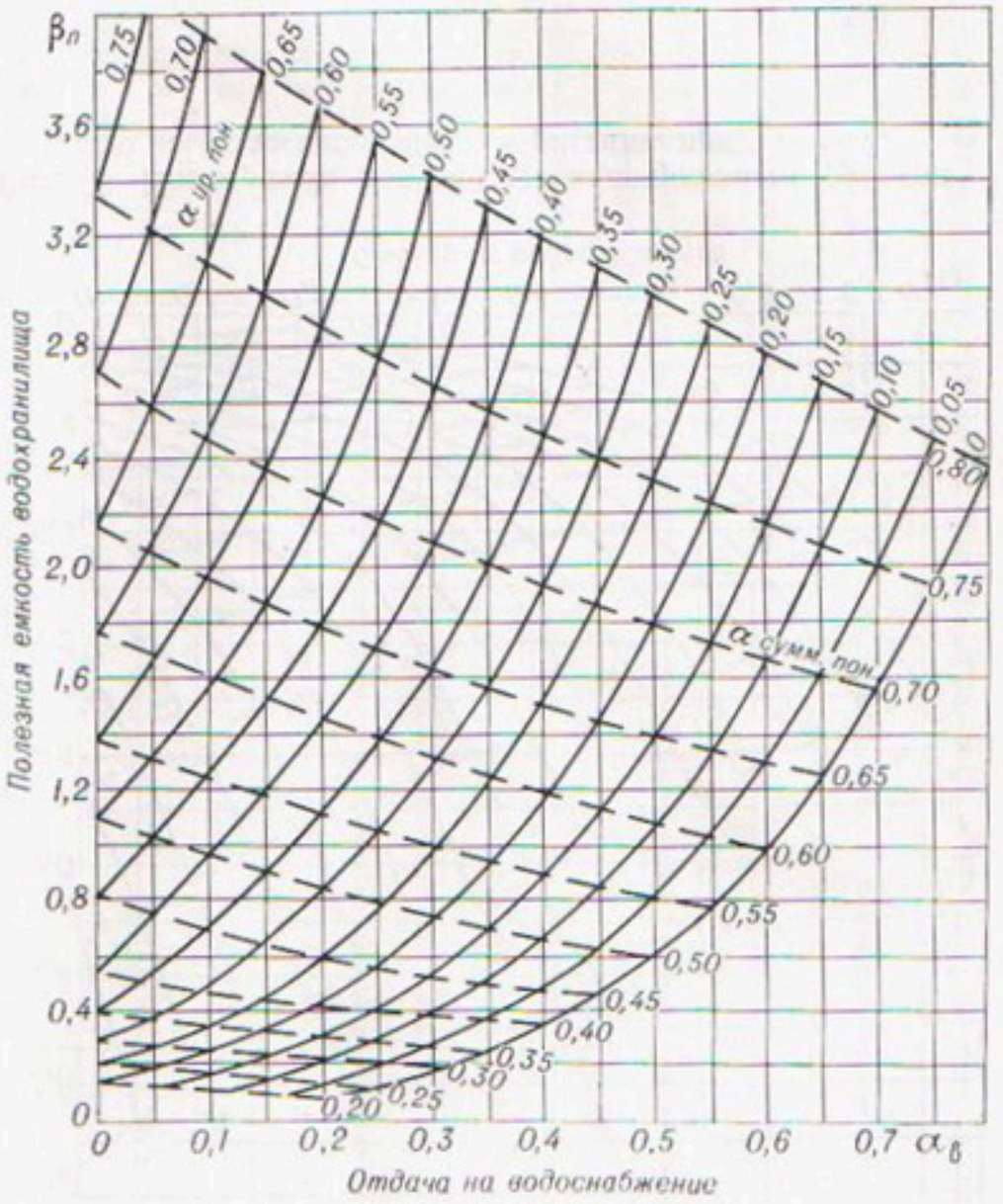


Рис. 70. Номограмма для расчета водохранилищ, работающих на водоснабжение и ирригацию при $C_{вг}=0{,}7$ (ориентировочная).

Хотя номограммы не дают непосредственно значения β_1, но накопленные расчеты по опорным точкам позволяют решить и этот вопрос.

§ 23. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА К ПОСТРОЕНИЮ НОМОГРАММ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ ЕМКОСТИ

Согласно диспетчерскому графику (см. рис. 65), полезный объем водохранилища делится на две составляющие, выполняющие различные функции.

Одна из составляющих определяется очертанием раздельной линии, которое зависит только от внутригодового распределения стока и водоотдачи и может быть разнообразным.

Вторую составляющую (β_1) можно назвать многолетней составляющей диспетчерской емкости.

На основе анализа материалов по расчету опорных точек были получены формулы для приближенного определения всей полезной ($\beta_п$) и многолетней диспетчерской (β_1) емкостей водохранилищ, регулирующих сток на две обеспеченности.

Формула для емкости, обслуживающей водоснабжение при $P=97\%$ и ирригацию (с обеспеченностью нормальной водоподачи $P=75\%$ и пониженной на 20% — $P=97\%$), имеет вид

$$\beta_п = \beta_{м\,97} + 2\left(\beta^п_{м\,75} - \beta^п_{м\,75}\right) + \beta_{с\,97} + \beta^о_{с\,97} - \beta^о_{с\,75}, \qquad (61)$$

где $\beta_п$ — рабочая, или полезная, емкость водохранилища; $\beta_{м\,97}$ — многолетняя составляющая емкости водохранилища, необходимая при обеспеченности $P=97\%$ суммарной пониженной отдачи ($\alpha_{с.\,п}=\alpha_в+0{,}8\alpha_{и.\,п}$), определяется по графикам Я. М. Плешкова для $P=97\%$; $\beta^н_{м\,75}$ — многолетняя составляющая емкости водохранилища, необходимая при обеспеченности $P=75\%$ суммарной нормальной водоотдачи ($\alpha_{с.\,п}=\alpha_в+\alpha_{и.\,п}$); $\beta^п_{м\,75}$ — многолетняя составляющая емкости водохранилища, необходимая при обеспеченности $P=75\%$ суммарной пониженной отдачи ($\alpha_{с.\,п}=\alpha_в+0{,}8\alpha_{и.\,п}$); значения $\beta^н_{м\,75}$ и $\beta^п_{м\,75}$ определяются по графикам Я. Ф. Плешкова для $P=75\%$; $\beta_{с\,97}$ — сезонная составляющая емкости при работе водохранилища с пониженной отдачей $\alpha_{с.\,п}$; определяется расчетом по году с модульным коэффициентом $K=\alpha_{с.\,п}$ или, если $\alpha_{с.\,п}<K_{97}$, — по году 97%-ной обеспеченности; $\beta^о_{с\,97}$ и $\beta^о_{с\,75}$ — емкости, потребные для полного регулирования стока лет 97- и 75%-ной обеспеченности при равномерной отдаче; определяются расчетом для соответствующих лет при $\alpha=K_P$.

В тех случаях, когда для обеспечения полной суммарной отдачи на 75% (или пониженной отдачи на 97%) не требуется многолетнего регулирования стока, т. е. когда $\alpha_{с.\,п}<K_{75}$ или $\alpha_{с.\,п}<K_{97}$, значение $\beta^о_с$ исчисляется по году с модульным коэффициентом K,

Таблица 51

Сопоставление величин полезной ($\beta_п$) и многолетней диспетчерской (β_1) емкостей водохранилища для водоснабжения и ирригации по подробным расчетам и по приближенной формуле

Суммарная пониженная отдача при $P = 97\%$			$C_v = 0{,}4$				$C_v = 0{,}5$				$C_v = 0{,}6$			
	в том числе		по расчету		по формуле		по расчету		по формуле		по расчету		по формуле	
$\alpha_{с.\,п}$	ирригация $\alpha_{и.\,п}$	водоснабжение $\alpha_в$	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1	$\beta_п$	β_1
0,8	0,8	0,0	—	—	—	—	3,10	0,78	3,14	0,81	—	—	—	—
0,8	0,6	0,2	2,0	0,50	1,86	0,54	2,50	0,70	2,44	0,81	2,95	0,80	3,0	1
0,8	0,4	0,4	—	—	—	—	2,00	0,75	1,98	0,81	—	—	—	—
0,8	0,3	0,5	1,30	0,54	1,36	0,54	—	—	—	—	—	—	—	—
0,8	0,2	0,6	—	—	—	—	1,65	0,75	1,64	0,81	—	—	—	—
0,8	0,0	0,8	0,93	0,00	0,94	0,00	1,30	0,00	1,32	0,00	1,71	0,00	1,78	—
0,7	0,3	0,4	0,80	0,32	0,85	0,33	—	—	—	—	1,30	0,62	1,49	—
0,6	0,6	0,0	0,75	0,17	0,67	0,16	0,94	0,27	1,04	0,28	—	—	—	—
0,6	0,4	0,2	—	—	—	—	0,75	0,29	0,82	0,28	—	—	—	—
0,6	0,3	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—	0,84	0,43	1,00	—
0,6	0,2	0,0	—	—	—	—	0,60	0,07	0,58	0,28	—	—	—	—
0,6	0,0	0,6	0,37	0,00	0,39	0,00	0,53	0,00	0,52	0,00	0,73	0,00	0,69	0
0,4	0,4	0,0	0,32	0,00	0,34	0,00	0,39	0,05	0,35	0,05	—	—	—	—
0,4	0,2	0,2	0,19	0,00	0,19	0,00	0,25	0,06	0,24	0,05	—	—	—	—
0,4	0,0	0,4	0,16	0,00	0,16	0,00	0,21	0,00	0,21	0,00	0,28	0,00	0,28	0
0,3	0,3	0,0	0,20	0,00	0,20	0,00	0,23	0,00	0,23	0,00	—	—	—	—
0,3	0,2	0,1	0,14	0,00	0,14	0,00	0,17	0,00	0,17	0,00	—	—	—	—
0,3	0,1	0,2	0,09	0,00	0,09	0,00	0,14	0,00	0,14	0,00	—	—	—	—
0,3	0,0	0,3	0,08	0,00	0,08	0,00	0,12	0,00	0,11	0,00	—	—	—	—
0,2	0,2	0,0	0,10	0,00	0,10	0,00	0,13	0,00	0,13	0,00	0,15	0,00	0,15	0
0,2	0,1	0,1	0,05	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,07	0,00	0,09	0,00	0,09	0
0,2	0,0	0,2	0,02	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,07	0,00	0,07	0

равным величине суммарной отдачи α (нормальной в первом случае и пониженной во втором).

Формула для приближенного определения многолетней диспетчерской емкости β_1 имеет вид

$$\beta_1 = \beta_{м\,97} - \beta_{м\,75} + \beta^{o}_{с\,97} - \beta^{o}_{с\,75}. \qquad (62)$$

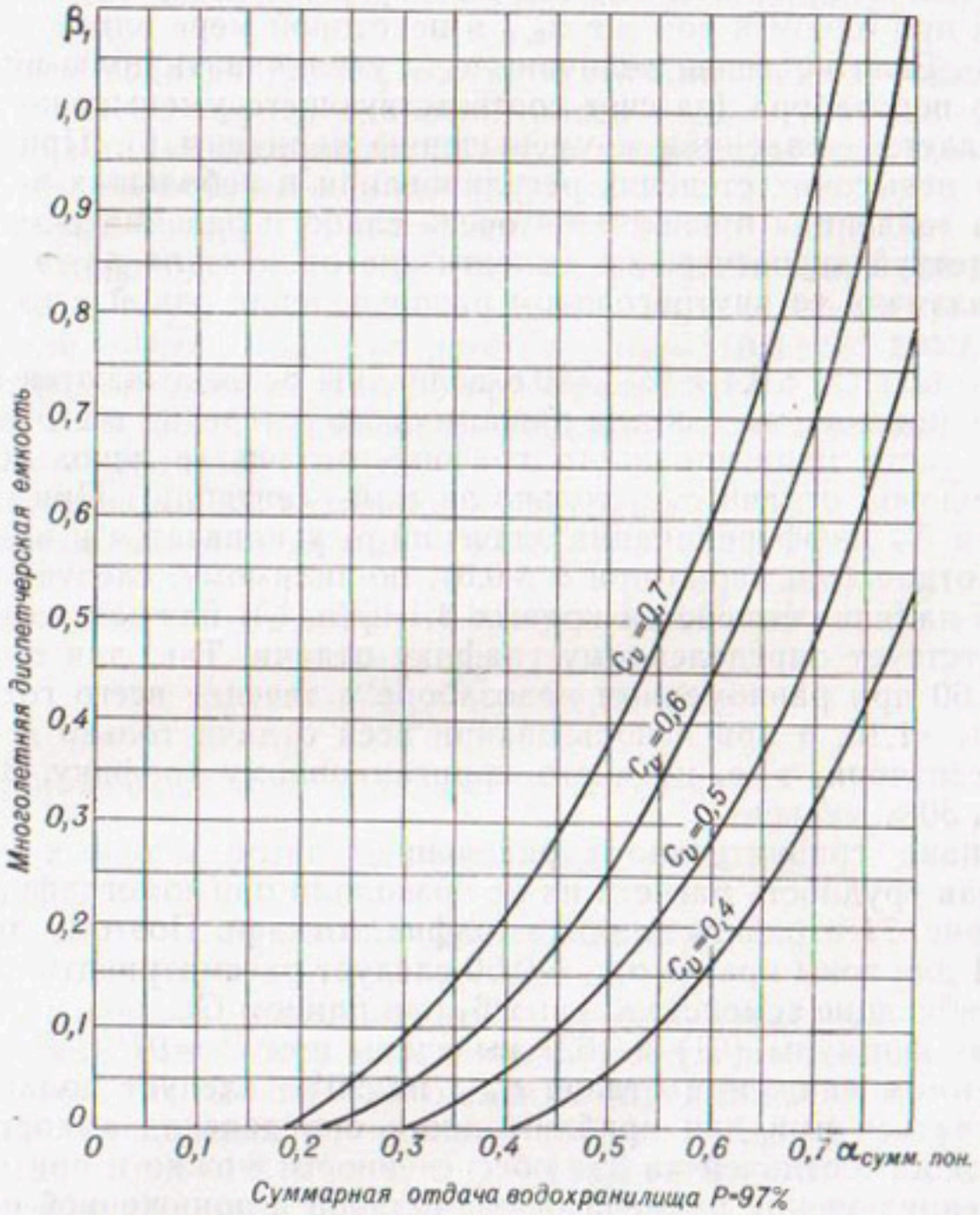


Рис. 71. Номограмма для определения многолетней диспетчерской емкости к началу весны.

Условные обозначения и порядок вычисления величин, входящих в формулу (62), те же, что и для формулы (61).

Сравнение результатов, полученных по формулам, с результатами подробных расчетов для опорных точек представлено в табл. 51.

На рис. 71 дана номограмма, построенная по формуле (62), для непосредственного определения многолетней диспетчерской емкости водохранилища β_1 при заданном C_v и суммарной пониженной

отдачи $\alpha_{с.\,п}$ при $P=97\%$ (с понижением $\alpha_{н.\,н}$ на 20%). Упомянутая формула выведена для заданных обеспеченностей $P_1=97\%$ и $P_2=75\%$ при $C_v=\text{const}$, причем принималось, что β_1 зависит только от степени регулирования $\alpha_{с.\,п}$ и соотношения между размерами нормальной и пониженной отдачи независимо от ее внутригодового распределения.

В действительности изменение внутригодового распределения отдачи при одном и том же $\alpha_{с.\,п}$ в некоторой мере влияет на величину β_1. Если не меняя величину $\alpha_{с.\,п}$ увеличивать долю ирригационного водозабора (за счет соответствующего уменьшения $\alpha_в$), то наблюдается тенденция к уменьшению величины β_1. При относительно невысоких степенях регулирования и небольших величинах C_v эта тенденция проявляется очень слабо и разница в значениях многолетней диспетчерской емкости ничтожно мала даже при резком различии во внутригодовом распределении одной и той же отдачи за год.

Так, при $C_v=0{,}4$ и $\alpha_{с.\,п}=0{,}6$ величины β_1 оказываются практически одинаковыми как для равномерного в течение всего года, так и для чисто ирригационного графика отдачи (с использованием всей годовой отдачи $\alpha_{с.\,п}$ только за май—сентябрь). При повышении α и C_v дифференциация значений β_1 усиливается и в зоне высоких отдач (примерно при $\alpha>0{,}6$), по-видимому, следует предполагать наличие семейства кривых $\beta_1=\varphi(\alpha_{с.\,п})$, каждая из которых соответствует определенному графику отдачи. Так, для $\alpha_{с.\,п}=80$ и $C_v=0{,}60$ при равномерном водозаборе в течение всего года величина $\beta_1=1{,}16$, а при использовании всей отдачи только в течение мая—сентября, т. е. по чисто ирригационному графику, $\beta_1=0{,}80$, или на 30% меньше.

Однако сравнительно ограниченное число опорных точек и большая трудность расчета их не позволили при номографировании β_1 на рис. 71 отразить влияние графика отдачи. Поэтому линии на рис. 71 для зоны правее $\alpha_{с.\,п}=0{,}60$ следует рассматривать как верхние огибающие семейств кривых β_1 при данном C_v.

Хотя формулы (61) и (62) выведены при $P_1=97\%$, $P_2=75\%$ и допустимом снижении отдачи $\alpha_{н.\,н}$ на 20%, следует полагать что пользоваться ими для приближенного определения емкости водохранилища с отдачей на две обеспеченности можно и при иных соотношениях между размерами нормальной и пониженной отдачи и других значениях обеспеченности. При этом необходимо, чтобы слагаемые в формулах имели новые, измененные индексы и соответствовали им. Очевидно, что применение формул (61) и (62) при других обеспеченностях и других изменениях ирригационной отдачи не относится к номограммам на рис. 67—70.

Пример 1. Дано: норма стока $\Gamma_0=189{,}4\cdot10^6$ м³/год, $C_v=0{,}50$, $m=0{,}45$, $t_м=10$ месяцам, полезный объем водохранилища 219 млн. м³, $\beta_п=1{,}16$, мертвый объем 24 млн. м³, годовые потери на испарение 400 мм, годовые потери на фильтрацию 300 мм, потери на оседание льда на борта водохранилища при его сработке незначительны и поэтому не учитываются, основное водопотребление

на водоснабжение при равномерном полезном водозаборе 90 млн. м³/год с обеспеченностью 97%.

Требуется: 1) определить возможность и величину полезного и равномерного в течение 5 месяцев водозабора для ирригации при $P=75\%$ с допускаемым снижением норм полива на 20% за пределами этой расчетной обеспеченности (от $P=75\%$ до $P=97\%$); 2) установить диспетчерскую емкость водохранилища.

Решение.

1. Объем водохранилища, соответствующий средней годовой величине потерь за период сработки, равен $\vartheta_{ср.\,кр}=(24+0{,}6\cdot 219)\times\times 10^6=155$ млн. м³, по кривым объемов и площадей ему соответствует площадь зеркала $F=29$ км².

2. Годовые потери: на испарение $0{,}4\cdot 29\cdot 10^6=11{,}6\cdot 10^6$ м³/год, на фильтрацию $0{,}3\cdot 29\cdot 10^6=8{,}7\cdot 10^6$ м³/год, всего $20{,}3\cdot 10^6$ м³/год.

3. Отдача брутто на водоснабжение: $A_{в.\,бр}=(90+20{,}3)\cdot 10^6=$ $=110{,}3$ млн. м³/год, чему соответствует $\alpha_в=110{,}3:189{,}4=0{,}58$.

4. По номограмме на рис. 68 при $C_v=0{,}5$, $\alpha_в=0{,}58$, $\beta_п=1{,}16$ находим $\alpha_{и.\,п}=0{,}155$, а нормальная полезная отдача на ирригацию будет $\alpha_{и.\,н}=1{,}25\cdot 0{,}155=0{,}194$.

При этом полезный водозабор составляет:

для нормального орошения ($P=75\%$)

$$A_{и.\,н}=0{,}194\cdot 189{,}4\cdot 10^6=36{,}6\cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$Q_{и.\,н}=\frac{36{,}6\cdot 10^6}{5\cdot 2{,}63\cdot 10^6}=2{,}78 \text{ м}^3/\text{с};$$

для пониженных норм полива ($P=75\div 97\%$)

$$A_{и.\,н}=0{,}8\cdot 36{,}6\cdot 10^6=29{,}3\cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$Q_{и.\,п}=0{,}8\cdot 2{,}78=2{,}22 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Следует обратить внимание на то, что в приведенном определении полезного водозабора на орошение потери из водохранилища не учитываем, так как они уже однажды определены.

5. Для определения β_1 находим $A_{с.\,п}=A_{в.\,бр}+A_{и.\,п}=(110{,}3+$ $+29{,}3)\cdot 10^6=139{,}6\cdot 10^6$ м³/год, $\alpha_{с.\,п}=139{,}6:189{,}4=0{,}74$, чему по графику (рис. 71) при $C_v=0{,}5$ удовлетворяет $\beta_1=0{,}59$ или $V_д=$ $=0{,}59\cdot 189{,}4\cdot 10^6=112\cdot 10^6$ м³. Величина $V_д$ — есть минимальная ордината диспетчерского графика, порядок построения которого показан в табл. 52.

При определении полезной $\beta_п$ и многолетней диспетчерской емкости β_1 водохранилища по заданной полезной отдаче расчет ведется по номограммам путем подбора.

Пример 2. Дано: норма стока $Г_0=220\cdot 10^6$ м³/год, $C_v=0{,}53$, $m=0{,}47$, $t_м=10$ месяцам; равномерный забор воды на водоснабжение вместе с потерями из водохранилища (для упрощения примера) 88 млн. м³/год при $P=97\%$, забор воды на орошение в течение 5 месяцев для площади нетто 18 300 га при средней поливной норме

Таблица 52

Расчеты к построению диспетчерского графика работы водохранилища на две обеспеченности отдачи

Элемент расчета	Весна (III—IV)	Летняя межень (вегетационный период)					Осенне-зимний период					Год
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	
Сток межени 1928-29 г. (модельный), млн. м³	—	6,62	8,63	6,09	1,97	2,44	4,35	6,40	7,08	5,29	3,60	52,1
%	—	12,0	16,5	11,7	3,8	4,7	8,4	12,3	13,5	10,2	6,9	100
Меженный сток в % от годового при $m=0,47$ по модели	—	5,7	7,7	5,5	1,8	2,2	3,9	5,8	6,3	4,8	3,3	47,0
схематизированный	—	6,5	6,5	5,5	2,0	2,0	4,0	6,0	6,0	5,0	3,5	47,0
Сток диспетчерского года Y ($K=\alpha_{с.г}=0,6$; $Г=0,6\cdot 220=132$), млн. м³	70,00	8,58	8,58	7,26	2,64	2,64	5,28	7,90	7,92	6,60	4,60	132
Объем расчетной отдачи при $P=97\%$ на водоснабжение, млн. м³	14,67	7,33	7,33	7,33	7,34	7,33	7,33	7,34	7,34	7,33	7,33	88

Элемент расчета	Весна (III—IV)	Летняя межень (вегетационный период)					Осенне-зимний период					Год
		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	
на орошение, млн. м³	—	8,80	8,80	8,80	8,80	8,80	—	—	—	—	—	44
всего $\Delta A_{бр}$, млн. м³	14,67	16,13	16,13	16,13	16,14	16,13	7,33	7,34	7,34	7,33	7,33	132
Разность между стоком и отдачей ($Y - \Delta A_{бр}$), млн. м³	55,33	—7,55	—7,55	—8,87	—13,50	—13,49	—2,05	0,56	0,58	—0,73	—2,73	
Интегральная разность $\Sigma(Y - \Delta A_{бр}) = \Delta V$, млн. м³	55,33	47,78	40,23	31,36	17,86	4,37	2,32	2,88	3,46	2,73	0,00	
То же с округлением, млн. м³	55	48	40	31	18	4	—	—	—	—	—	
Ординаты диспетчерского графика (на конец интервала) $V_t = \Delta V + V_д$ при $V_д = 72$, млн. м³	127	120	112	103	90	76	—	—	—	—	—	

Примечание. Ординаты диспетчерского графика вычислены для периода ирригационной отдачи (май—сентябрь).

брутто (с учетом 15% потерь по пути) равен 3000 м³/га[1] при $P=75\%$ с понижением поливной нормы на 20% при $P=97\%$.

Требуется определить полезную емкость водохранилища и найти координаты диспетчерского графика.

Решение.

Забор на ирригацию: нормальный $3000 \cdot 18\,300 = 55 \cdot 10^6$ м³/год, пониженный $0{,}8 \cdot 55 \cdot 10^6 = 44 \cdot 10^6$ м³/год.

Суммарная нормальная отдача

$$A_{с.\,н} = (88 + 55) \cdot 10^6 = 143 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$\alpha_{с.\,н} = 143 : 220 = 0{,}65.$$

Суммарная пониженная отдача

$$A_{с.\,н} = (88 + 0{,}8 \cdot 55) \cdot 10^6 = 132 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$\alpha_{с.\,п} = 132 : 220 = 0{,}60,$$

в том числе $\alpha_в = 88 : 220 = 0{,}4$, $\alpha_{и.\,п} = 0{,}6 - 0{,}4 = 0{,}2$.

Величина $m=0{,}47$ несколько отличается от принятой при расчете и построении номограмм ($m=0{,}45$). Но поскольку разница незначительна, объемы определяются непосредственно по номограммам.

Имея в виду $\alpha_{с.\,н}=0{,}6$ и $\alpha_{и.\,п}=0{,}2$, находим: при $C_v=0{,}4$ $\beta_п = 0{,}46$, при $C_v=0{,}5$ $\beta_п=0{,}60$ и при $C_v=0{,}6$ $\beta_п=0{,}87$.

Графической интерполяцией для $C_v=0{,}53$ находим полезную емкость водохранилища $\beta_п=0{,}66$, причем $V_п = 0{,}66 \cdot 220 \cdot 10^6 = 145 \cdot 10^6$ м³.

Многолетняя диспетчерская емкость определена по рис. 71 и равна $\beta_1=0{,}33$, причем $V_д = 0{,}33 \cdot 220 \cdot 10^6 \approx 72 \cdot 10^6$ м³.

Очертание диспетчерского графика внутри периода (май—сентябрь), подлежащего диспетчеризации, найдено расчетом по году, объем стока которого равен объему суммарной пониженной отдачи водохранилища (по году с модульным коэффициентом $K=\alpha_{с.\,п}$).

Распределение притока в водохранилище внутри межени принято с некоторой схематизацией по аналогии с меженью фактического близкого к среднему 1928-29 г.

Расчет ординат диспетчерского графика приведен в табл. 52.

§ 24. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НОМОГРАММ И РАСЧЕТ КАСКАДНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Принятое при расчете и построении номограмм среднее соотношение между объемами меженного и годового стока ($m=0{,}45$) не исключает возможности их применения для случаев с отклонением

[1] Определено как среднее из ряда лет дополнение из водохранилища к используемым почвой осадкам (в размере 45% годовых) из расчета необходимого полезного объема воды 4600 м³/га. Дополнение из водохранилища в каждом году умножено на 1,15 для учета попутных потерь подаваемой воды.

внутригодового распределения от расчетного, если длительность сезонов не слишком отличается от расчетной (половодье — 2 месяца, межень — 10 месяцев).

Возможны две формы отклонений от расчетного распределения, принятого при построении номограмм:

1. Когда общее распределение стока на половодье и межень сохраняется (55 и 45%), а изменяется лишь распределение стока внутри меженного периода. Такие изменения не оказывают никакого влияния на результаты водохозяйственного расчета при многолетнем и в тех случаях сезонного регулирования, когда оно охватывает весь период межени. Переход от выравнивания стока между отдельными месяцами межени к регулированию межени в целом, например по малым рекам Украины и средней полосы ЕТС, возникает уже при очень небольших коэффициентах регулирования. Так, при $C_v = 0{,}40$ и $m = 0{,}5$ сток расчетной маловодной межени 97%-ной обеспеченности не превышает здесь 15—20% среднего объема годового стока. Иными словами, уже при $\alpha = 0{,}18 \div 0{,}25$ регулирование распространяется на весь 10-месячный период низких расходов.

Таким образом, если в целом сохраняется $m = 0{,}45$, то предлагаемые номограммы могут применяться при весьма разнообразных формах гидрографа межени без каких-либо поправок. Только при очень низких степенях регулирования, маловероятных для указанных районов, может возникнуть необходимость индивидуализировать водохозяйственный расчет применительно к конкретному внутримеженному распределению стока.

2. Когда средние объемы половодья и межени не составляют соответственно 55 и 45% объема стока в средний год (в подобных случаях вопрос о том, остается ли распределение стока внутри межени близким к расчетному или также меняется, имеет лишь второстепенное значение). Для таких случаев определение емкости по предлагаемым номограммам дает некоторую погрешность, устраняемую введением соответствующей поправки. Размеры поправки установлены из следующих соображений. Понятно, что величина многолетней емкости, необходимой для выравнивания объемов стока за целые годы, не зависит от колебаний его внутригодового распределения. Изменение объема расчетного стока межени сказывается лишь на размерах сезонной емкости, сглаживающей неравномерность стока в пределах года.

При простейшем сезонном регулировании, если значение α достаточно для того, чтобы регулирование охватывало не отдельные месяцы, а всю межень, потребная емкость водохранилища равна

$$\beta_c = \alpha t - \alpha m.$$

При увеличении объема стока межени на Δm

$$\beta_c = \alpha t - \alpha (m + \Delta m),$$

откуда

$$\Delta\beta_c = \Delta\beta = -\alpha\,\Delta m.$$

Если отдача водохранилища сосредоточена по времени в пределах части межени, как наблюдается, например, при оросительном водопотреблении, то при определении емкости должен учитываться не весь меженный сток, а лишь часть его, приходящаяся на период отдачи. Соответственно

$$\Delta\beta=(-\alpha\,\Delta m)\,K,$$

где K — используемый приток в долях полного объема меженного стока.

Применительно к условиям, принятым для расчетов к построению номограмм, сток за 5 оросительных месяцев равен (см. табл. 47)

$$K=\frac{24{,}8}{45}=0{,}55.$$

В результате формулы для поправок примут вид:
для равномерной отдачи

$$\Delta\beta=-\alpha\,(m-0{,}45),$$

для чисто оросительной отдачи

$$\Delta\beta=-0{,}55\alpha\,(m-0{,}45),$$

где m — фактическая доля межени в годовом объеме стока рассматриваемой реки.

Величины поправок $\Delta\beta$ для нескольких характерных значений α и m приводятся в табл. 53. В этой таблице показаны поправки для крайних форм графика отдачи; при ином распределении отдачи между водоснабжением и ирригацией поправки следует брать по интерполяции между табличными данными. Данные табл. 53 приме-

Таблица 53

Поправки $\Delta\beta$ к полезной емкости $\beta_п$ по номограммам (рис. 67—70)

Отдача водохранилища для $P=97\%$ $\alpha_{с.\,п}$	Средняя доля меженного стока в годовом				
	$m=0{,}35$	$m=0{,}40$	$m=0{,}45$	$m=0{,}50$	$m=0{,}55$
При $\alpha_{с.\,п}=\alpha_в$ (ирригация отсутствует)					
0,4	0,04	0,02	0,00	—0,02	—0,04
0,5	0,05	0,03	0,00	—0,03	—0,05
0,6	0,06	0,03	0,00	—0,03	—0,06
0,7	0,07	0,04	0,00	—0,04	—0,07
0,8	0,08	0,04	0,00	—0,04	—0,08
При $\alpha_{с.\,п}=\alpha_{и.\,п}=0{,}8\ \alpha_{и.\,п}$ (водоснабжение отсутствует)					
0,4	0,02	0,01	0,00	—0,01	—0,02
0,5	0,03	0,01	0,00	—0,01	—0,03
0,6	0,03	0,02	0,00	—0,02	—0,03
0,7	0,04	0,02	0,00	—0,02	—0,04
0,8	0,05	0,03	0,00	—0,03	—0,05

нимы при любых коэффициентах изменчивости годового стока. Если параметры стока и потребления столь сильно отличаются от положенных в основу построения номограмм, что использование последних становится невозможным (например, при иной длительности сезонов года или расчетного вегетационного периода, измененных нормативах обеспеченности и т. п.), для приближенного определения параметров водохранилища могут быть рекомендованы формулы, подобные (61) и (62).

Область применения предложенных номограмм распространяется также на проектирование каскадно расположенных водохранилищ, что видно из следующего.

Анализ номограмм (рис. 67—70) показал, что при выбранных обеспеченностях отдачи емкость водохранилища остается практически постоянной, если не изменяется суммарная отдача $\alpha_{с.\,п} = \alpha_в + \alpha_{п.\,п} = \text{const}$, независимо от соотношения между компонентами водопотребления. Иначе говоря, различные точки номограммы, соответствующие одной и той же емкости, имеют одинаковую сумму $\alpha_в + 1{,}25\alpha_{п.\,п}$. Это видно из данных табл. 54.

Таблица 54

Изменение емкости водохранилища $\beta_п$ при различном распределении его нормальной отдачи ($\alpha_{с.\,п} = \text{const}$) на водоснабжение и орошение

Коэффициент изменчивости годового стока C_v	Отдача α (брутто)					Емкость водохранилища $\beta_п$	Изменение емкости по сравнению со случаем $\alpha_{с.\,п} = \alpha_в$	
	на водоснабжение $P = 97\%$	на орошение		всего				
		нормальная, $P = 75\%$	пониженная, $P = 97\%$	нормальная, $P = 75\%$	пониженная, $P = 97\%$		Δβ	%
0,40	0,50	—	—	0,50	0,50	0,26	—	—
	0,30	0,20	0,16	0,50	0,46	0,25	—0,01	4,0
	0,10	0,40	0,32	0,50	0,42	0,26	0,00	0,0
0,40	0,70	—	—	0,70	0,70	0,58	—	—
	0,50	0,20	0,16	0,70	0,66	0,60	+0,02	3,5
	0,30	0,40	0,32	0,70	0,62	0,59	+0,01	1,8
	0,10	0,60	0,48	0,70	0,58	0,59	+0,01	1,8
0,50	0,70	—	—	0,70	0,70	0,83	—	—
	0,50	0,20	0,16	0,70	0,66	0,82	—0,01	1,3
	0,30	0,40	0,32	0,70	0,62	0,78	—0,05	6,0
	0,10	0,60	0,48	0,70	0,58	0,78	—0,05	6,0
0,50	0,80	—	—	0,80	0,80	1,35	—	—
	0,60	0,20	0,16	0,80	0,76	1,32	—0,03	2,2
	0,40	0,40	0,32	0,80	0,72	1,30	—0,05	3,7
	0,20	0,60	0,48	0,80	0,68	1,25	—0,10	7,4
	0,00	0,80	0,60	0,80	0,64	1,22	—0,13	9,7
0,60	0,70	—	—	0,70	0,70	1,15	—	—
	0,50	0,20	0,16	0,70	0,66	1,13	—0,02	1,7
	0,30	0,40	0,32	0,70	0,62	1,08	—0,07	6,1
	0,10	0,60	0,48	0,70	0,58	1,08	—0,07	6,1

Даже при коренном изменении водохозяйственного плана, например при переходе к полному использованию водохранилища только на орошение, если отдача $\alpha_{с.\,н}$ остается постоянной, полезная емкость изменяется не более чем на 10% по сравнению с ее величиной только для водоснабжения с обеспеченностью $P=97\%$.

Для промежуточных сочетаний $\alpha_в$ и $\alpha_{и.\,н}$, если $\alpha_{с.\,н}=\text{const}$, изменение потребной емкости $\beta_п$ еще меньше. Это позволяет при сопоставлении регулирующей способности водоемов каскада не учитывать различий в распределении отдачи между орошением $\alpha_{и.\,н}$ и водоснабжением $\alpha_в$; между собой сравниваются лишь величины $\alpha^{в}_{97}$ и $\alpha^{н.\,ч}_{97}$, определяемые как для постоянной отдачи (см. рис. 38—41 и 46) при обеспеченности $P=97\%$ (здесь $\alpha^{в}_{97}$ и $\alpha^{н.\,ч}_{97}$ — коэффициенты регулирования стока с верхнего $\alpha^{в}$ и нижнего частного $\alpha^{н.\,ч}$ водосборов для водоснабжения, т. е. на равномерную отдачу, см. § 37).

Такое упрощение позволяет также установить величину суммарной отдачи включаемых в расчет водохранилищ ниже раздельного створа, так как иначе положение раздельного створа было бы неясным, поскольку коэффициенты $\alpha_{с.\,н}$ нормальной отдачи по всем створам с различными соотношениями отдачи на ирригацию различны.

В случае каскада из двух водохранилищ при $\alpha^{н.\,ч}_{97}>\alpha^{в}_{97}$, согласно § 37, отдача $\sum_2 A_{бр}$ и $\alpha^{н}_{общ}$ относятся к нижнему створу, причем собственная отдача нижнего водохранилища равна

$$A^{н}_{бр}=\sum_2 A^{н}_{бр}-A^{в}_{бр}.$$

Величину $A^{н}_{бр}$ следует рассматривать при наличии двух потребителей как полную отдачу брутто, которую и требуется распределять между промышленным ($P=97\%$) и ирригационным ($P=75\%$) водозабором в соответствии с заданием по проекту и с учетом потерь из водохранилища, а также поступлений воды из верхнего водоема (фильтрация из него и попуски).

Если предварительное сравнение величин равномерной в году отдачи показывает, что $\alpha^{в}_{97}>\alpha^{н.\,ч}_{97}$, следует лишь уточнить коэффициенты регулирования, определив их для заданных $\beta^{в}_{п}$ и $\beta^{н}_{п}$ по номограммам (рис. 67—70) при желательных соотношениях между водоснабжением и ирригацией, т. е. приняв

$$\alpha^{в}_{с.\,н}=1{,}25\alpha^{в}_{и.\,п}+\alpha^{в}_{в},$$

$$\alpha^{н.\,ч}_{с.\,н}=1{,}25\alpha^{н.\,ч}_{и.\,п}+\alpha^{н.\,ч}_{в},$$

где $\alpha^{в}_{с.\,н}$ и $\alpha^{н.\,ч}_{с.\,н}$ — величины нормальной отдачи.

Дальнейший расчет нижней по стоку ступени с частного водосбора сводится к установлению полезной отдачи (нетто).

Итак, расчет двухступенного каскада водохранилищ для водоснабжения и ирригации ведется в следующем порядке:

1. Верхнее водохранилище рассчитывается обычным порядком по номограммам (рис. 67—70) с определением $\alpha^{в}_{с.п}$ и $\alpha^{в}_{с.н}$.

2. Порядок расчета нижнего водохранилища определяется сопоставлением $\alpha^{в}_{97}$ и $\alpha^{н.ч}_{97}$, устанавливаемых по рис. 38—41 и 46 применительно к принятой обеспеченности водоснабжения $P=97\%$ для верхнего и нижнего полезных объемов $\beta^{в}_{п}$ и $\beta^{н}_{п}$ ($\beta^{в}_{п}=V^{в}_{п}:\Gamma^{в}_{0}$, $\beta^{н}_{п}=V^{н}_{п}:\Gamma^{н}_{0}$).

3. При $\alpha^{в}_{97}>\alpha^{н.ч}_{97}$ отдача нижнего водохранилища лишь уточняется по номограммам на рис. 67—70 для значений $\beta^{н}_{п}$ и $\Gamma^{н}_{0}$ при заданном соотношении $\alpha^{н.ч}_{и.н}$ и $\alpha^{н.ч}_{в}$, принимая $\alpha^{н.ч}_{с.н}=1{,}25\alpha^{н.ч}_{и.п}+\alpha^{н.ч}_{в}$.

4. При $\alpha^{н.ч}_{97}>\alpha^{в}_{97}$ отдача брутто нижнего водохранилища определяется как разность $A^{н.ч}_{бр\,97}=\sum A_{бр\,97}-A^{в}_{бр\,97}$, где $\sum A_{бр\,97}$ определяется по общему коэффициенту регулирования $\alpha_{общ\,97}$, общей норме притока для включаемых в расчет водохранилищ $\sum\Gamma_0$ (см. § 37) и при обеспеченности $P=97\%$. Определение $\alpha_{общ\,97}$ (при заданной емкости низового водохранилища) производится путем подбора и с учетом того, что к нижнему створу относится сумма лишь многолетних объемов обоих водохранилищ. Сезонная же емкость определяется по стоку с нижнего водосбора (см. § 37).

5. При определении полезных отдач следует учитывать объем воды, поступающей из верхнего водохранилища в нижнее в виде возвратных (от потребителей, обслуживаемых верхней ступенью), фильтрационных и других вод.

При большем числе ступеней каскада расчет в принципе не меняется.

§ 25. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ДЛЯ ЛЮБЫХ ДВУХ ВОДОПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ

При наличии многолетнего стокового ряда путем подбора может быть определена как общая полезная емкость водохранилища для обслуживания двух водопотребителей с различной степенью обеспеченности, так и положение диспетчерской линии наполнений, требующих перехода на пониженную отдачу. Обеспеченность для каждого из водопользователей определяется по общему числу бесперебойных лет в фактическом ряду, т. е. по формулам (9) и (10).

За неимением длительных рядов, а также для контроля репрезентативности их и надежности результатов, получаемых по этим рядам, используются графики (рис. 67—70), составленные в основном для орошения и водоснабжения при комбинации обеспеченностей 75 и 97%.

Для тех же целей, но без регламентации обеспеченностей и характера водопользователей применяется также расчетная схема С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [61], которая хотя и является, по замечаниям авторов, приближенной, но позволяет определять емкость и диспетчерскую границу изменения отдач при любых (из

числа обычно рассматриваемых) комбинациях двух обеспеченностей (рис. 72). При этом общая полезная емкость $V_п$ определяется обычными методами, описанными в гл. V (с использованием соответствующих графиков и формул), и служит для получения повышенной отдачи $Q_п$ или $\alpha_п$. Приведенная обеспеченность для отдачи $Q_п$ находится по формуле

$$P = P_{Q_п} + \frac{Q_г}{Q_п}(P_{Q_г} - P_{Q_п}). \qquad (63)$$

Составные части емкости $V_п$ (рис. 72), определяемой по приведенной обеспеченности P и для повышенной отдачи $Q_п$, а также буквенные значения формулы (63) имеют следующий смысл: $V'_п$ — полезная емкость, соответствующая повышенной отдаче $Q_п$ и ее обеспеченности $P_{Q_п}$ (например, $P_{Q_п} = 75\%$); $V'_п$ определяется согласно указаниям гл. V; W_1 — предполоводная сработка, отвечающая половодью с обеспеченностью $P_{Q_п}$ и повышенной отдаче $Q_п$; W_2 — предполоводная сработка, отвечающая половодью с обеспеченностью $P_{Q_г}$ (например, $P_{Q_г} = 97\%$) и гарантированной отдаче $Q_г$ или $\alpha_г$.

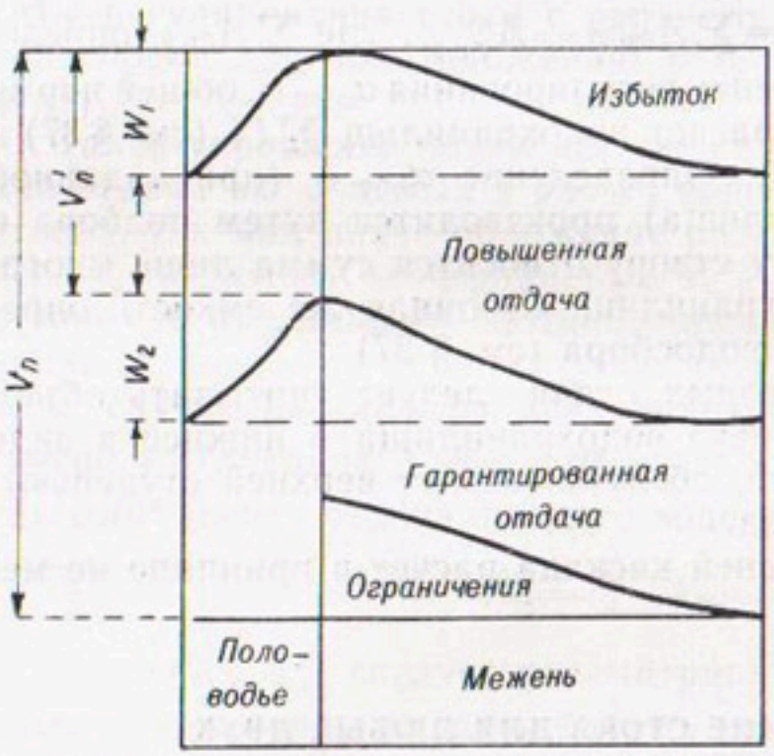


Рис. 72. Составляющие емкости и зоны диспетчерского графика для водохранилища, работающего на две системы водоотдачи (по схеме С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля).

Интересным является также предложение Н. П. Вутке по определению отдачи водохранилища для двух разнообеспеченных водопотребителей (например, $P_{Q_п} = 90\%$ и $P_{Q_г} = 97\%$). Смысл этого предложения состоит в следующем. Находится полезная отдача всего водохранилища $Z_г$ только по обеспеченности $P_{Q_г}$; при разных вариантах одной составляющей отдачи $X_г$ при $P_{Q_г}$ определяются соотношения $K_X = X_г : Z_г$ и $K_Y = 1 - K_X = Y_г : Z_г$ для другой составляющей $Y_г$.

Таким образом, вначале предполагается, что обе составляющие X и Y участвуют в отдаче Z с равной обеспеченностью. Затем определяется повышенная полезная отдача всего водохранилища $Z_п$ только по обеспеченности $P_{Q_п}$, и по найденной ранее величине K_Y находится отдача для потребителя с меньшей обеспеченностью $Y_п = K_Y Z_п$ и комбинированная отдача $X_г + Y_п$. С увеличением доли $X_г$ комбинированная отдача уменьшается (табл. 55).

Таблица 55

Расчет полезной отдачи водохранилища на две системы обеспеченностей (по Н. П. Вутке)

Потребление X_{97}, 10^6 м³/год	Полезная отдача всего водохранилища Z_{97}, 10^6 м³/год	Доля водопотребления двух участников		Полезная отдача всего водохранилища Z_{90}, 10^6 м³/год	Потребление $Y_{90} = K_Y Z_{90}$, 10^6 м³/год	Комбинированная отдача $(X_{97} + Y_{90})$, 10^6 м³/год
		$K_X = \frac{X_{97}}{Z_{97}}$	$K_Y = \frac{Y_{97}}{Z_{97}}$			
20,0	103,0	0,194	0,806	141,34	113,8	133,8
30,0	103,0	0,291	0,709	141,34	100,0	130,0
40,0	103,0	0,389	0,611	141,34	86,4	126,4
50,0	103,0	0,485	0,515	141,34	72,6	122,6
60,0	103,0	0,584	0,416	141,34	58,7	118,7
70,0	103,0	0,680	0,320	141,34	45,2	115,2
80,0	103,0	0,777	0,223	141,34	31,4	111,4

Как уже отмечалось в § 4, при наличии нескольких водопотребителей с мало отличающимися градациями обеспеченностей последние желательно сводить к минимуму ступеней, большей частью к двум.

Применительно к режиму работы водоема на две обеспеченности отдачи используется также расчетная схема, описанная В. А. Бахтиаровым [12]. Расчет производится по обобщенному методу 1940 г. [61] на основе статистических параметров стока половодья и межени.

Как и в схеме Д. В. Коренистова (см. § 22—24), здесь также подбором определяется вся полезная емкость (без разделения на многолетнюю и сезонную составляющие) и верхняя часть ее, необходимая для покрытия нормальной, т. е. полной отдачи с пониженной обеспеченностью, равной, например $P=90\%$. Эта часть относится к началу межени, т. е. к концу весны. Остальная же, нижняя часть емкости должна быть сработана на покрытие только гарантированной (пониженной) отдачи с высокой обеспеченностью, допустим, $P=95\%$.

Техника расчетов по фазам стока, скажем, для указанных двух обеспеченностей отдачи состоит в следующем.

Для заданного годового полезного водопотребления, увеличенного предварительно на осредненные годовые потери из водохранилища (для получения отдачи брутто), назначается полезная емкость. Эта емкость, согласно схеме С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (рис. 72), предположительно делится на верхнюю и нижнюю зоны, которые должны к началу межени соответствовать: первая — нормальной обеспеченной ($P=90\%$) отдаче за межень, вторая — пониженной отдаче за тот же сезон ($P=95\%$). Затем производится обычное построение кривых обеспеченности наполнений по фазам стока с переходом от одной фазы к другой и с соблюдением величин отдачи соответственно наличным начальным наполнениям водоема при построении частных кривых. Связь смежных фаз стока обычно

не учитывается, так как она в большинстве случаев отсутствует или незначительна.

Построения по фазам стока продолжаются до наступления установившихся общих кривых обеспеченности наполнений водохранилища к концу половодья и к концу межени.

Решение считается найденным, если общая кривая для конца межени пересекает ось абсцисс в точке заданной обеспеченности ($P=95\%$), а на кривой к концу половодья объем для $P=90\%$ как раз равен объему нижней зоны. Если эти условия не соблюдаются, требуется изменить емкость водохранилища или границу деления ее или то и другое вместе и найти необходимое решение описанным выше путем. Такое решение с применением, как и в первом методе, двойного графоаналитического подбора является довольно громоздким. Но оно вполне рационально по своей строгости и удобно тем, что при решении определяются также координаты начальной и конечной точек раздельной линии отдач на графике эксплуатации водохранилища. Верхней точкой этой линии в конце весны является емкость на границе раздела зон водоема, если она меньше многолетней составляющей емкости для полного водопотребления при $P=90\%$. (В противном случае принимается эта последняя.) Нижняя точка линии определяется по установившейся кривой обеспеченности наполнений к концу межени также при $P=90\%$.

При наличии третьего водопотребителя ($P=75\div80\%$) емкость делится на три зоны, причем объемы по кривой обеспеченности наполнений к концу половодья должны соответствовать следующим обеспеченностям: $P=75\div80\%$ для суммы объемов средней и нижней зон (верхняя сработана), $P=90\%$ для объема нижней зоны (верхние две сработаны). Сработка нижней зоны до ГМО лимитируется кривой обеспеченности наполнений не к концу половодий, а обычно к концу межени и соответствует пересечению этой кривой с осью P при $P=95\%$.

Пример. Определить емкость водохранилища при следующих условиях:

Статистические характеристики стока: $Г_0=223\cdot10^6$ м^3, $П_0=133{,}7\cdot10^6$ м^3, $М_0=89{,}3\cdot10^6$ м^3, $C_{vг}=C_{vм}=0{,}35$, $C_{vп}=0{,}55$, $C_s=2C_v$.

	Весна	Межень	Год
Нормальная отдача ($P=90\%$), 10^6 м^3			
полезная	16	156	172
брутто ($\alpha_н=0{,}845$) . . .	16	170	186
Пониженная отдача ($P=95\%$), 10^6 м^3			
полезная	16	134	150
брутто ($\alpha_н=0{,}74$)	16	150	166

Примечание. Для весны изменения отдачи при переходе к пониженной обеспеченности не предусматриваются, так как в это время вода подается только одному потребителю и в небольшом количестве. Потери воды за весну в данном случае не учитываются.

Задаемся размерами водохранилища. Полезная емкость 180×10^6 м³, верхняя ее часть (зона нормальной отдачи, $P=90\%$) — выше наполнения $100 \cdot 10^6$ м³, нижняя часть (зона пониженной отдачи, $P=95\%$) — ниже указанной раздельной границы. Требуется подтвердить, что при этих емкостях заданное водопотребление соответствует своим обеспеченностям.

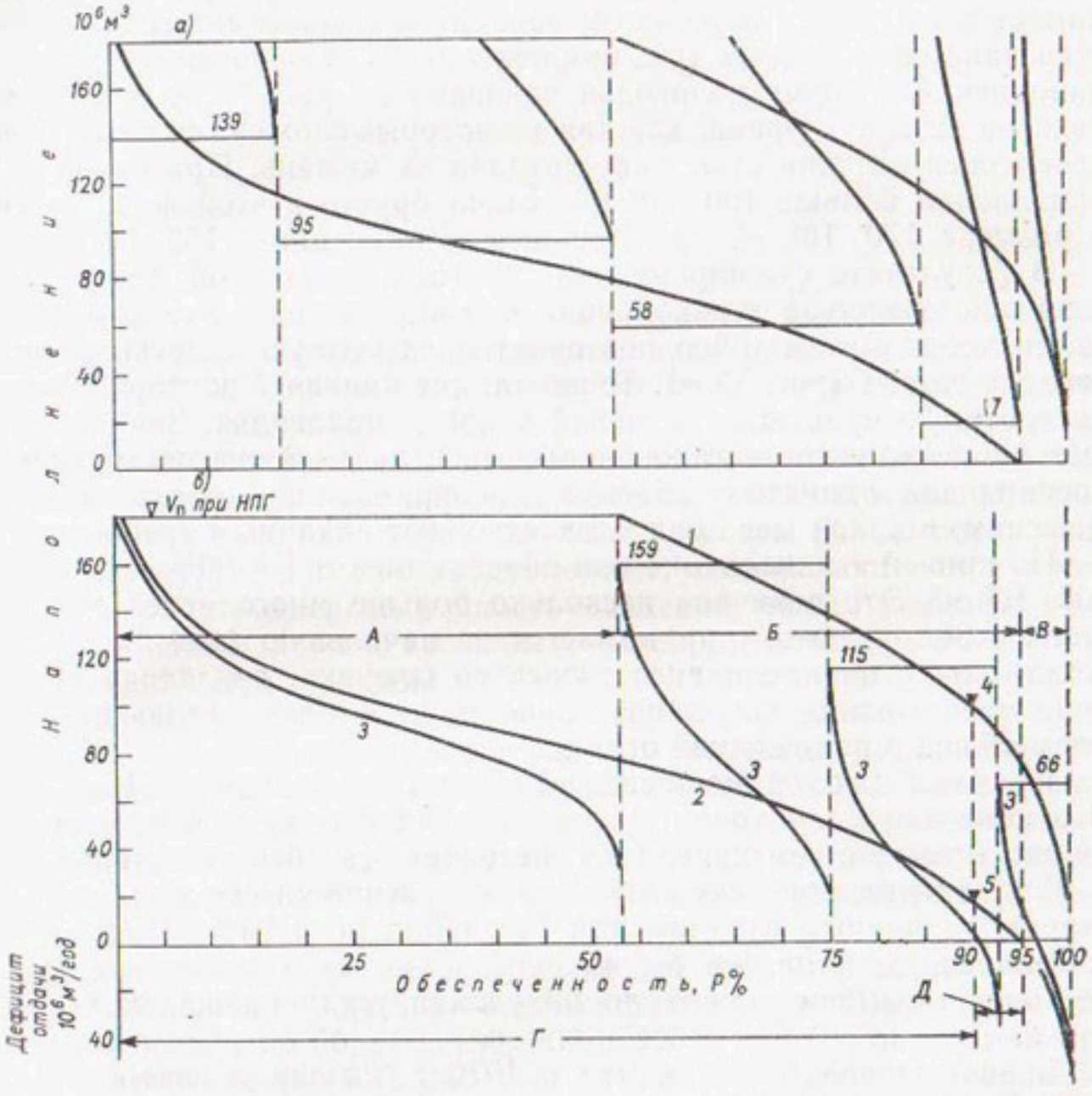


Рис. 73. Расчет емкости водохранилища на две системы обеспеченности отдачи.

а — фаза половодья, *б* — фаза межени; *1* — установившаяся кривая обеспеченности наполнений к концу половодья, *2* — то же к концу межени, *3* — частные кривые обеспеченности наполнений к концу межени, *4*, *5* — наименьшие наполнения в начале и конце межени для нормальной отдачи ($P=90\%$); *А* — зона сбросов, *Б* — зона сработки, *В* — зона перебоев, *Г* — зона полной отдачи, *Д* — зона пониженной отдачи.

Принятые емкости являются уже найденными, и потому расчет (см. приложение V) показывает соответствие их заданным требованиям.

На рис. 73 *а* приведена кривая обеспеченности наполнений водохранилища к концу межени, разделенная на пять ступеней, суммируемых с частными кривыми обеспеченности величин сток минус

отдача за половодье. Соответственно каждой ступени, представляющей осредненное начальное наполнение, получена частная кривая конечных наполнений к концу половодья (приложение V). Частные кривые конечных наполнений строятся при помощи общей для всех кривых шкалы ординат и суммируются, как описано в § 11 и 13.

Ось абсцисс для каждой кривой равна ширине ступени, но принимается за 100% с пересчетом процентов в миллиметры для удобства нанесения кривых (см. приложение V). Полученная кривая *1* наполнений к концу половодья показана на рис. 73 *б*, она разделена на четыре ступени, каждая из которых сложена с кривой обеспеченности величин сток минус отдача за межень. При начальном наполнении больше $100 \cdot 10^6$ м³ отдача брутто в этой фазе учтена в размере $170 \cdot 10^6$ м³, при меньшем наполнении — $150 \cdot 10^6$ м³.

В результате суммирования частных кривых этой фазы получена общая кривая *2* наполнений к концу межени. Эта кривая по своим координатам точно повторяет предыдущую кривую к концу того же сезона (рис. 73 *а*). Точно так же кривая *1* повторяет ранее построенную кривую наполнений к концу половодья. Значит, кривые *1* и *2* являются установившимися, и дальнейшие построения и расчеты для принятых объемов водохранилища прекращаются. Выясним, в какой мере они удовлетворяют заданным требованиям.

По кривой *1* наполнение при обеспеченности $P = 90\%$ составляет $100 \cdot 10^6$ м³. Эта величина несколько больше многолетней емкости для $P = 90\%$ и потому принимается за начальную (для начала межени) точку на линии диспетчерского графика, разделяющей его поле между осями координат «наполнение — время года» на зоны нормальной и пониженной отдачи.

Кривая *2* для той же обеспеченности дает наполнение $15 \cdot 10^6$ м³. Это конечная (для конца межени) точка упомянутой раздельной линии. Вместе с тем кривая *2* пересекает ось абсцисс в точке $P = 95\%$. Значит, полезная емкость и ее деление на две зоны удовлетворяют заданным отдачам для P, равных 90 и 95%. При других соотношениях пришлось бы изменить емкости и выполнить снова все расчеты и построения до получения установившихся кривых *1* и *2*.

В заключение отметим, что в 1970 г. вышли в свет графики В. А. Киктенко и В. Г. Логинова для расчета водохранилищ на две обеспеченности отдачи [49].

Глава IX

РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

К числу тепловых электростанций (ТЭС), входящих в энергосистему, относятся мощные конденсационные районные электростанции (ГРЭС) и электростанции или турбины централизованной теплофикации (ТЭЦ). Последние создаются в крупных городах и, вырабатывая электричество, обеспечивают промышленность и город тепловой энергией (для паровых молотов, горячего водоснабжения, отопления и т. п.). Теплофикационные агрегаты разделяются на два вида: 1) турбины с противодавлением, использующие для производства электроэнергии разность давлений между входным высоким давлением пара и выходным — низким, обеспечивающим теплофикацию. Эти агрегаты не имеют конденсаторов и работают по вынужденному графику тепловой нагрузки; 2) турбины с промежуточным отбором пара, работающие с конденсаторами, как обычные агрегаты ГРЭС, но обеспечивающие отбор пара (между ступенями турбины) для теплофикации.

Теплофикационные нагрузки сравнительно невелики: общая мощность агрегатов, обслуживающих эти нагрузки, редко превышает 200 тыс. квт.

Современные турбины изготовляются разной мощности — от нескольких тысяч квт до 500—800 тыс. квт и более. Широко применяются агрегаты по 50, 100, 150, 200 и 300 тыс. кВт, при параметрах пара: давление 90, 130, 240 ата; температура соответственно 535, 565 и 580° С.

Все агрегаты ГРЭС и ТЭЦ находят свое место в балансе мощности и энергии системы (см. § 35). Здесь же рассматривается только водное хозяйство ГРЭС.

Многочисленные государственные районные тепловые электростанции (ГРЭС) составляют к настоящему времени особую и значительную категорию водопотребителей, требующих больших и высокообеспеченных расходов воды.

Для этого в условиях маловодных районов, не имеющих достаточно водообильных водотоков, необходимо регулирование поверхностного стока с учетом специфических особенностей, вызываемых работой ГРЭС (имеется в виду режим и размеры водопотребления,

а также необходимость охлаждения воды при циркуляционном водоснабжении оборудования крупных современных электростанций).

Существует несколько схем циркуляционно-прудового водоснабжения ГРЭС [1]. Но схемы, связанные с регулированием стока, можно разделить на два основных вида.

1) Раздельная схема. Охлаждение циркуляционного потока производится специальным прудом-охладителем, имеющим достаточную для охлаждения воды поверхность (зеркало) и поддерживающим практически постоянный горизонт воды. Регулирование же стока выполняется особым водохранилищем, расположенным выше (или даже в другом водосборе) и обеспечивающим попусками или путем перекачки возмещение потерь и безвозвратных отъемов воды из пруда-охладителя. По такой схеме построены Штеровская, Зуевская, Шахтинская и другие ГРЭС в Донбассе.

2) Совмещенная схема. Регулирование стока и охлаждение воды производятся одним водохранилищем, причем величина охлаждающей площади во времени изменяется в связи с переменным наполнением водоема при регулировании стока. По такой схеме работает ряд ГРЭС.

Первая схема выгодно отличается постоянством горизонтов пруда, допускает значительное приближение площадки ГРЭС к урезу пруда и сокращает до минимума высоту подачи воды (5—8 м) и водопроводящие коммуникации между прудом и ГРЭС. Вторая схема этих преимуществ не имеет, но более проста в эксплуатации, поскольку приурочена к одному гидроузлу.

Выбор той или иной схемы зависит от топографических и геологических условий, а также от сравнения затоплений, капиталовложений, эксплуатационных издержек и других показателей по обеим схемам (размещение площадки ГРЭС, поселок для нее, питьевое водоснабжение, сантехника, железнодорожные коммуникации, особые условия и т. п.).

§ 26. ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ ГРЭС И ЕГО ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ

Техническая вода подается на ГРЭС для охлаждения конденсаторов и прочего оборудования, а также для других потребностей.

Количество подаваемой воды зависит от ее температуры, единичной мощности агрегатов и особенностей оборудования (для одноходовых конденсаторов требуется на 20—40% воды больше, чем для двухходовых; при среднем давлении также необходимо на 20—30% воды больше, чем при высоком).

В табл. 56 приведены относительные расходы воды на нужды ГРЭС [47]. Потребное количество воды для охлаждения агрегатов

---

[1] Обоснование расчетного расхода воды в реке для прямоточно-циркуляционного водоснабжения ГРЭС без регулирования стока предложено автором в форме метода заменяющего водохранилища [77].

Таблица 56

Относительные расходы воды на технические нужды ГРЭС с турбинами среднего давления и двухходовыми конденсаторами

Назначение расходуемой воды	Расход воды, %
Охлаждение конденсаторов	100
„ масла и воздуха (газа) мощных турбин	3—7
Охлаждение подшипников	0,5—1
Питание котлов ГРЭС	0,2—0,4
„ „ ТЭЦ с большим отбором пара	0,5—0,8 и более
Транспортирование золы и шлака (зависит от рода топлива, количества улавливаемой золы и метода транспортирования золы и шлака)	2—5
Пополнение потерь в случае применения градирен и брызгальных установок	4—6
Испарение с площади пруда-охладителя от подогрева в теплообменниках (в среднем за год)	0,7—1

при различной их мощности и высоком давлении дано в табл. 57. Расход воды для всей установки пропорционален числу ее однотипных агрегатов.

Таблица 57

Расходы воды для охлаждения оборудования ГРЭС из расчета на один агрегат, м³/с

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

Работа ГРЭС сопровождается также безвозвратными отъемами воды из водохранилища, к которым относятся следующие виды расходов воды.

1. Испарение воды $И_д$, вызываемое искусственным, дополнительным подогревом ее с последующим рассеянием тепла, выносимого с электростанции (сюда не входит естественное испарение, которое, как и фильтрация, относится к природным потерям воды из водохранилища и учитывается при определении его полезной

отдачи). Известно, что для рассеяния 590 ккал должен испариться 1 л воды. Фактически воды при этом теряется меньше, так как рассеяние тепла (охлаждение) происходит не только через испарение, но и конвекционным путем и частично излучением.

В условиях юго-запада и средней полосы ЕТС рассеяние тепла путем испарения составляет летом примерно 70—75% и зимой 40—55%. Остальное тепло рассеивается в основном конвекцией.

Безвозвратный отъем воды $И_д$ на рассеяние тепла изменяется по сезонам года и зависит от разности температур Δt воды, сбрасываемой с электростанции t_1 и забираемой для охлаждения t_2, что видно из данных табл. 58.

Таблица 58

Потери воды на испарение от подогрева ее в конденсаторах $\Delta t = t_1 - t_2$ (% от расхода охлаждающей воды)

Сезон года	Подогрев воды, °С				
	5	10	15	20	25
Лето	0,5	0,9	1,4	1,9	2,3
Весна и осень . .	0,3	0,7	1,0	1,4	1,7
Зима	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1

На современной электростанции с агрегатами по 100 тыс. кВт каждым из них на рассеяние тепла безвозвратно расходуется 0,8 млн. м³ воды за 6600 ч работы ГРЭС в течение года. Летом на испарение от подогрева расходуется 30—35 л/с на 100 тыс. кВт мощности. Примерный расчет потерь воды $И_д$ на испарение от подогрева ее в конденсаторах приведен в табл. 59. Более точно эти потери можно определить по тепловому балансу (§ 27).

2. Питание котловой водой электростанции (пополнение потерь в пароводяном цикле). Вода для этих нужд подается после ее химической подготовки (обессоливания). Общее безвозвратное количество питающей воды вместе с потерями в звеньях химической очистки (промывка фильтров, утечки и т. п.) за время работы ГРЭС составляет примерно 12 л/с на 100 тыс. кВт мощности.

3. Расходы воды на удаление золы. На современных ГРЭС удаление золы производится гидравлическим способом, под напором воды (гидрозолоудаление). Потребность воды для этих целей зависит от схемы гидрозолоудаления и от зольности топлива. При использовании водообильного источника золоудаление производится по прямоточной схеме (без возврата воды); при ограниченных водных ресурсах вода используется в замкнутом цикле гидрозолоудаления с отстаиванием ее на золоотвале. Расход воды на гидрозолоудаление составляет в среднем 60 л/с на 100 тыс. кВт мощности. В случаях прямоточного золоудаления весь указанный расход воды, если он забирается из водохранилища, является безвозвратным для него. При замкнутом цикле безвозвратной будет лишь

Потери воды на испарение от подогрева при мощности ГРЭС $N = 6 \cdot 100 = 600$ тыс. кВт

Сезон года (месяц)	Число часов использования мощности за сезон	Расход всей охлаждающей воды, м³/с	Расход воды на масло-газо-воздухоохладители, м³/с	Расход воды на охлаждение конденсаторов, м³/с	Расход пара на конденсаторы, т/с	Кратность охлаждения $m = \frac{\text{расход воды}}{\text{расход пара}}$	Подогрев воды в конденсаторах $\Delta t°$	Потери воды на испарение от подогрева, %	Общее количество охлаждающей воды, 10^6 м³	Потери воды на испарение от подогрева, 10^6 м³
Лето 1-е (V—VI)	1108	34,6	1,33	33,3	0,5	66,6	8,02	0,74	138,3	1,023
Лето 2-е (VII—IX)	1662	34,6	1,33	33,3	0,5	66,6	8,02	0,74	207,9	1,535
Осень (X—XI)	1100	23,9	1,33	22,6	0,5	45,2	11,9	0,81	94,6	0,766
Зима (XII—II)	1630	23,9	1,33	22,6	0,5	45,2	11,9	0,51	140,2	0,715
Весна (III—IV)	1100	23,9	1,33	22,6	0,5	45,2	11,9	0,81	94,6	0,767
	$\Sigma = 6600$								Итого:	4,806

$$\Delta t_л = \frac{535}{66,6} = 8,02° \text{ C}, \quad \Delta t_з = \frac{535}{45,2} = 11,9° \text{ C}$$

Примечание. Величина 535 есть разность между теплосодержанием пара и конденсата (ккал/л).

часть расхода воды, теряемой в золоотвале на фильтрацию и испарение. Принято считать, что на золоотвале пропадает 15—25% расхода воды на золоудаление, причем безвозвратные потери на 100 тыс. кВт составляют примерно 15 л/с за время работы установки.

К потребителям воды относятся также железнодорожный транспорт (в связи с систематической доставкой угля на ГРЭС) и другие комплексно обеспечиваемые водопользователи, например, орошение, попуски в нижний бьеф для поддержания санитарного минимума и бытовых потребностей населенных пунктов и т. п.

Кроме перечисленных отъемов воды, в ряде случаев при раздельной схеме регулирования стока и охлаждения воды производится периодическая смена водных масс — промывка пруда-охладителя в связи со значительным нарастанием минерализации (или температуры) воды в пруде.

Общее ориентировочное количество безвозвратной воды для ГРЭС мощностью 600 тыс. кВт без учета прочих водопользователей, санитарных попусков и расходов на промывку водохранилища приведено в табл. 60.

Таблица 60

Сводка безвозвратного водопотребления (в тыс. м³) для ГРЭС мощностью $N = 6 \cdot 100 = 600$ тыс. кВт

Сезон года (месяц)	Вид потребления воды				
	испарение от подогрева	гидрозолоудаление (замкнутое)	хим. водоочистка	железнодорожный транспорт	итого
Лето 1-е (V—VI)	1023	554	277	11,1	1865
Лето 2-е (VII—IX)	1535	831	415	16,6	2798
Осень (X—XI)	766	550	275	11,0	1602
Зима (XII—II)	715	815	407	16,3	1955
Весна (III—IV)	766	550	275	11,0	1602
Итого за год	4806	3300	1650	66,0	9822

Безвозвратный расход воды на 100 тыс. кВт мощности равен $9{,}822 : 6 = 1{,}64$ млн. м³/год (за 6600 ч работы в году). Эту величину надо расценивать как приближенную. Фактическая потребность ГРЭС в воде колеблется в зависимости от действительных потерь воды в золоотвале, расходов воды на химводоочистку (промывка фильтров, например, бывает более частой при плохом качестве воды) и т. п. Практически считается, что общее безвозвратное водопотребление ГРЭС при замкнутом гидрозолоудалении и при оборудовании установки агрегатами по 50—100 тыс. кВт составляет $1{,}6—2{,}0 \cdot 10^6$ м³/год на 100 тыс. кВт мощности. С увеличением мощности в одном агрегате удельное безвозвратное потребление воды снижается.

Из вышеизложенного видно, что как безвозвратные отъемы, так и особенно расходы воды для охлаждения агрегатов ГРЭС сравни-

тельно большой мощности являются настолько значительными, что при использовании для этих целей малых и даже средних рек часто требуется устройство циркуляционных прудов-охладителей или водохранилищ для регулирования стока с очень надежным обеспечением необходимой водоотдачи.

Приближенные размеры зеркала пруда или расчетной охлаждающей площади водохранилища (вблизи ГМО), а также его полезная отдача должны быть не меньше (желательно больше) указанных в табл. 61, в которой площадь брутто зеркала (в пределах от сброса до водозабора) определена при коэффициенте использования $\psi = 0{,}7$. Там же показан необходимый минимальный расход свежей воды при естественной ее температуре $t_e = 25°$ для прямоточно-циркуляционного водоснабжения ГРЭС (без пруда).

Таблица 61

Минимальная площадь брутто расчетного зеркала водохранилища, его полезная отдача и минимальный приток свежей воды (при охлаждении без пруда) для одного агрегата ГРЭС

Мощность одного агрегата, тыс. кВт	Минимальный приток воды для охлаждения (без пруда), м³/с	Минимальная площадь зеркала брутто, км²	Полезная отдача водохранилища (безвозвратное водопотребление ГРЭС вместе с испарением от подогрева воды в пруде), 10^6 м³/год
100 (или 2·50)	2,75	0,7—0,8	1,6—2,0
200	4,15	1,0—1,1	3,0—3,4
300	5,5	1,4—1,5	3,9—4,2

Примечание. Минимальный приток или минимальная площадь зеркала обеспечивает полную мощность ГРЭС в критических условиях ее работы. Для экономичной работы ГРЭС в средних условиях требуется более значительная площадь зеркала. В частности, для агрегата в 300 тыс. кВт только активная зона площади должна составлять 1,2—1,4 км² (редко 1,5 км²).

Необходимая весьма высокая водообеспеченность ГРЭС определяется чрезвычайно важной ролью воды в работе тепловой электростанции.

В работе [25] приводятся результаты экономических расчетов по проектируемым водохранилищам. При этом получены следующие величины обеспеченности в зависимости от удельного ущерба при недодаче 1 м³ воды потребителю;

— при ущербах 0,3 руб/м³ (ирригация) $P = 80 \div 94\%$,

— при ущербах 2,0 руб/м³ (промпредприятия) $P = 96 \div 99\%$,

— при ущербах 5,0—10,0 руб/м³ (ГРЭС) $P > 99\%$.

По замечаниям авторов работы [25], ущерб 5,0—10,0 руб/м³ соответствует конденсационным электростанциям, для которых должна быть возможность повышения обеспеченности водоотдачи до $P > 99\%$.

Интересны также и следующие энергетические данные.

Если на электростанциях различного типа в течение некоторого времени (например, 5—7 месяцев) в связи с дефицитом воды, т. е. перебоем по водоотдаче, не хватает на покрытие безвозвратного водопотребления, допустим, 0,5 м³/с, то при этом происходит прекращение выдачи следующих мощностей за тот же период времени:

— ГЭС с напором 20 м при потере расхода 0,5 м³/с — 80 кВт;

— ГРЭС с речным охлаждением при снижении расхода свежей воды на 0,5 м³/с против расчетного минимального — 18 000 кВт[1];

— водохранилищная ГРЭС при прекращении безвозвратного отъема воды в размере 0,5 м³/с (дефицит воды, т. е. перебой в отдаче водохранилища) — 800 000 кВт[1].

Приведенные данные показывают, насколько ценна вода для тепловых электростанций, особенно для водохранилищных, которые требуют резервирования возможностей, повышения водообеспеченности даже до $P > 99\%$.

Существующими ведомственными нормами обеспеченность регулирования стока для водохранилищных ГРЭС принимается равной $P = 97\%$. Однако приведенные выше сведения о важности воды для таких ГРЭС требуют повышения водообеспеченности до $P > 97\%$. Эти возможности имеются по водохранилищам ГРЭС в связи с особенностями регулирования стока для тепловых электростанций по второй схеме.

§ 27. РАСЧЕТ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ В ПРУДЕ И ПОТЕРЬ НА ИСПАРЕНИЕ ОТ ПОДОГРЕВА

Неотъемлемым элементом проектирования водохранилища для ГРЭС является построение плана течений в пределах летней площади. Течения в пределах водохранилища относятся к зоне транзитного потока $\omega_т$ и примыкающих к нему водоворотов $\omega_в$. Эти течения вызываются циркуляционным потоком при охлаждении конденсаторов и захватывают некоторую часть площади зеркала пруда $\omega_{пр}$ в пределах от водовыпуска до водозабора с включением в нее водоворотов, смежных с транзитным потоком (без учета застойных зон).

Значительную долю от суммы $\omega_т + \omega_в$ составляет так называемая активная зона $\omega_а$, в пределах которой происходит рассеяние в атмосферу тепла, вынесенного водой из конденсаторов ГРЭС. Выявление этой зоны при летних отметках уровня воды в водоеме-охладителе производится на основе лабораторного моделирования или гидравлического (теоретического) построения плана течений [118].

---

[1] Приведен порядок величин, так как цифры могут колебаться в зависимости от сезона года, типа оборудования и т. п.

По данным модельного испытания течений пруда или на основе гидравлических построений выясняется, какую долю занимает площадь транзитного потока $\omega_т$ от общей площади $\omega_{пр}$ (в пределах от водовыпуска до водозабора).

Активная площадь зеркала $\omega_а$ находится по соотношению $\omega_а = \psi\omega_{пр}$, где ψ — коэффициент использования пруда, зависящий от соотношения $\omega_т : \omega_{пр}$.

Приближенные координаты этой зависимости установлены Теплоэлектропроектом по наблюдениям на нескольких водохранилищах и приводятся в табл. 62.

Таблица 62

Координаты кривой $\psi = \varphi(\omega_т : \omega_{пр})$

$\omega_т : \omega_{пр}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ψ	0	0,25	0,43	0,56	0,66	0,74	0,80	0,84	0,87	0,89	0,90

Изменение температуры воды транзитного потока вдоль активной зоны пруда-охладителя при оборотном водоснабжении теплообменников для установившегося режима определяется по зависимости

$$\omega_{уд} = \frac{\Omega_а}{\sum Q} = \int_{t_2}^{t_1} \frac{dt}{A\left[(e_м - e'_м) + \frac{B}{A}(k_1 t - t_е) + \frac{\Delta I}{A}\right]}. \qquad (64)$$

Здесь $\omega_{уд}$ — удельная активная зона, т. е. охлаждающая площадь, приходящаяся на 1 м³ суточного объема $\sum Q$ подогретой воды, поступающей с ГРЭС, м²/м³ · сут.; $\Omega_а$ — общая активная площадь пруда, м²; t_1, t_2 — температуры воды, сбрасываемой в пруд и забираемой из него; $A = 0{,}231 + 0{,}031\ w_{2,0}$ — коэффициент теплоотдачи при испарении, ткал/м² · сут. · мм (рт. ст.), где $w_{2,0}$ — скорость ветра на высоте 2,0 м над водной поверхностью, м/с; $B = 0{,}48A$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией, ткал/м² · сут. · град.; t, $t_е$ — температура воды в пруде при подогреве (t) и естественная ($t_е$), град.; $e_м$, $e'_м$ — максимальная упругость пара воздуха соответственно при температурах t и $t_е$, мм рт. ст. Естественная температура воды $t_е$ принимается по данным наблюдений в водоемах, аналогичных по климатическим условиям, размерам в плане и глубине. При отсутствии таких данных $t_е$ определяется подбором по уравнению теплового баланса, в соответствии с Указаниями [118]

$$A(e'_м - e) + B(k_1 t_е - T) - R = 0, \qquad (65)$$

где T, e — температура воздуха (град.) и соответствующая ему упругость паров (мм рт. ст.); R — радиационный баланс, ткал/м² × × сут.; данные для его определения приведены в ТУ [118]; $\Delta I = M(k_1 t - t_е)$ — дополнительное эффективное излучение активной площади водоема за счет его только искусственного подогрева, ткал/м² · сут., причем величина ΔI сравнительно невелика, ею

часто пренебрегают. $M=0{,}001t_e+0{,}086$ — коэффициент теплоотдачи излучением, ткал/м² · сут. · град.; $k_1=t_п:t_{ср}$, где $t_п$, $t_{ср}$ — поверхностная и средняя по глубине температура воды; для естественных водоемов глубиной до 5 м летом $k_1\approx1{,}04$. В тепловых расчетах принимается $k_1=1$.

Интегрирование в формуле (64) заменяется последовательным суммированием. Для этого принимаем температуру воды в пруде $t=40$, 39, 38, ..., постепенно уменьшающуюся на $x=1\div3°$, и находим соответствующую им упругость паров $e_м$. Далее расчет выполняется, как показано в табл. 63.

Таблица 63

Расчет координат кривой падения температуры воды вдоль активной зоны пруда при $t_e=20{,}4°$ ($e'_м=11{,}97$ мм), $w_{2,0}=2{,}4$ м/с; $A=0{,}306$ ткал/м² · сут. · мм, $B=0{,}147$ и $M=0{,}106$ ткал/м² · сут. · град., $(B+M):A=0{,}83$

$t°$ С	$e_м$ мм	$N'_1=e'_м-e_м$ мм	$t-t_e$	$N'_2=0{,}83(t-t_e)$ мм	N_1+N_2 мм	$N_3=\frac{1}{A(N_1+N_2)}$ м²/м³ · сут · град	$\Delta\omega_{уд}=\frac{N'_3+N''_3}{2}x$ м²/м³ · сут	$\omega_{уд}$ м²/м³ · сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	55,32	37,35	19,6	16,3	53,65	0,061	—	0
39	52,44	34,47	18,6	15,4	49,87	0,066	0,063	0,063
38	49,69	31,72	17,6	14,6	46,32	0,070	0,068	0,131
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .

Примечание. Размерность N_3 учитывает то, что рассеяние 1 ткал тепла эквивалентно охлаждению 1 м³ воды на 1° С.

По данным граф 1 и 9 (табл. 63) вычерчивается кривая, соответствующая заданным $w_{2,0}$ и t_e. Такую кривую можно построить при любом подогреве воды и использовать для расчета охлаждения в системах прямоточного и оборотного водоснабжения. Семейство подобных кривых показано на рис. 74.

Кривые падения температур используются для решения следующих задач:

1) по заданным $\omega_{уд}$ и Δt находят t_1 и t_2,
2) при известных t_1 и $\omega_{уд}$ определяют t_2,
3) для заданных t_1 и t_2 получают $\omega_{уд}$.

Первая задача решается путем подбора: на кривой находят две точки, разность абсцисс которых равна $\omega_{уд}$, а разность ординат $\Delta t=t_1-t_2$.

Поскольку большей частью t_1 и t_2 неизвестны, то во избежание подбора ряд семейств упомянутых кривых объединен в один

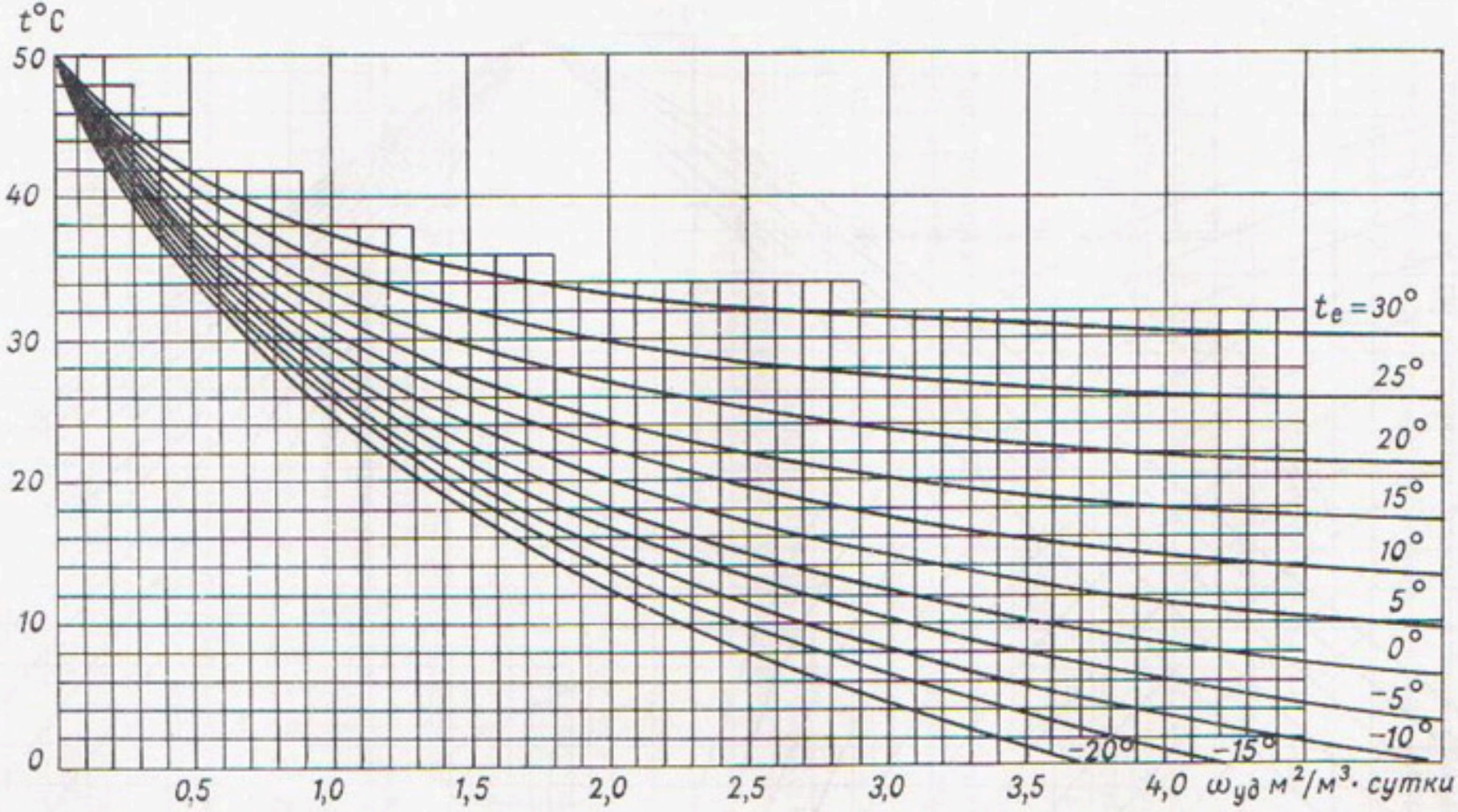


Рис. 74. Кривые падения температуры подогретой воды вдоль активной зоны водоема-охладителя при скорости ветра $w_{2,0}=2,0$ м/с.

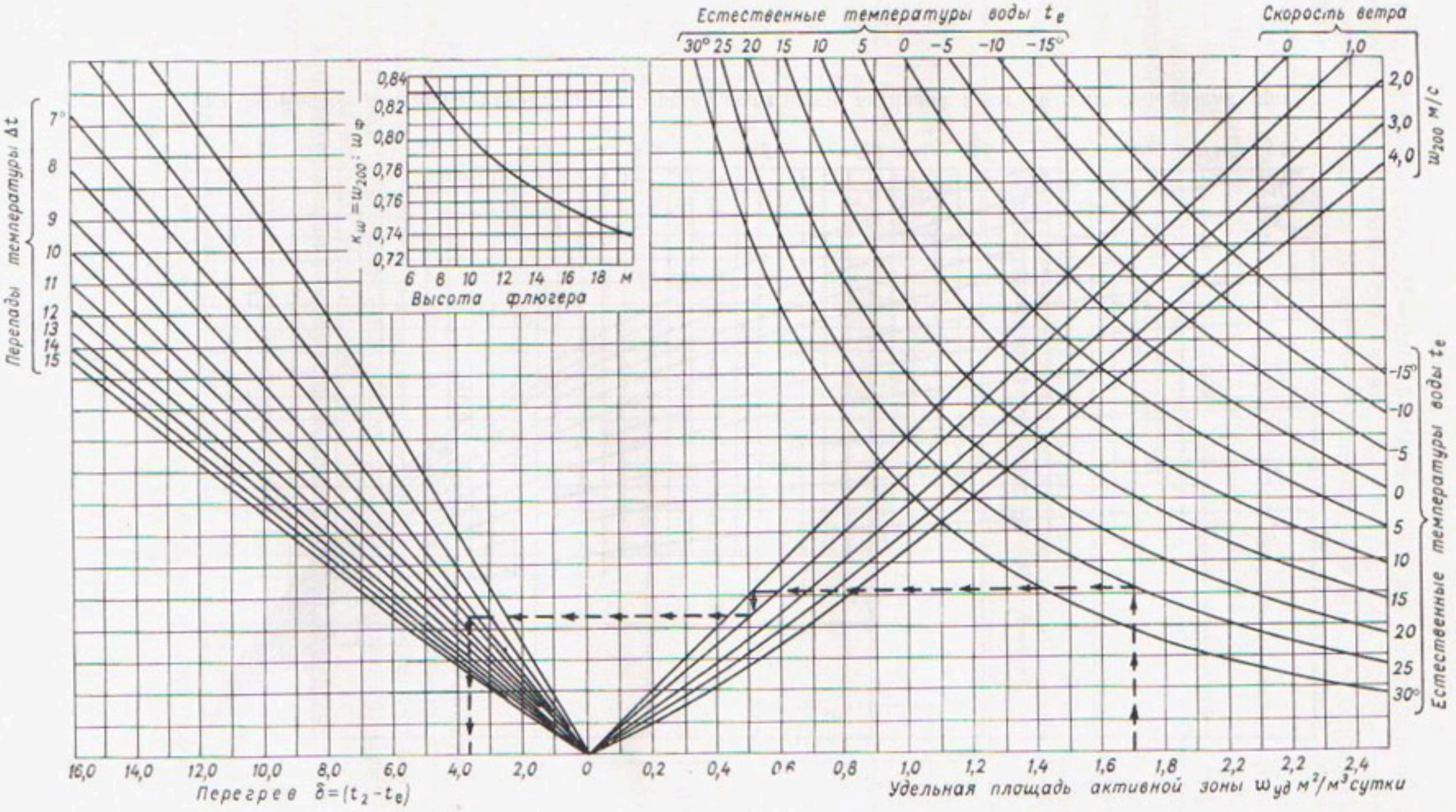


Рис. 75. Номограмма ТЭПа для теплового расчета прудов-охладителей.

график, используемый для расчета охлаждения воды только при оборотном водоснабжении теплообменников (рис. 75). На этом рисунке дается также вспомогательная кривая для коэффициента приведения скорости ветра на высоте флюгера $h_ф$ к скорости на высоте 2,0 м над поверхностью водоема $w_{2,0}=k_ф w_ф$. Кривая $k_ф$ построена по соотношению

$$k_ф=\frac{\lg(2/z_0)}{\lg(h_ф/z_0)},$$

где z_0 — шероховатость водной поверхности, принятая равной 0,003 м.

При расчетах по графику исходными являются: а) удельная активная летняя площадь, м²/м³ · сут.; б) расчетная естественная температура воды в водоеме t_e; в) скорость ветра на высоте 2,0 м от поверхности воды (на графике требуется привязка к скорости 0 м/с с переходом от нее к принятой скорости), м/с; г) подогрев воды в конденсаторах $\Delta t°$.

На графике показан путь расчета, по которому находится установившийся перегрев воды в водоеме δ°, причем установившаяся температура у водозабора t_2 будет равна $t_2=t_e+\delta$.

Для расчета охлаждения воды используются также аналитические зависимости. Приведем одну из них.

Если известны t_1, t_2 и t_e, можно найти $t_{ср}$ на участке кривой падения температур в пределах от t_1 до t_2 по формуле

$$t_{ср}=t_e+\frac{t_1-t_2}{\ln\frac{t_1-t_e}{t_2-t_e}}. \qquad (66)$$

После преобразований формула (66) получает вид

$$t_2=t_e+\frac{\Delta t}{\exp\frac{\Delta t}{t_{ср}-t_e}-1}. \qquad (66')$$

Эта формула позволяет находить t_2, если известны t_e, Δt и $t_{ср}$, найденное, например, по уравнению (67).

Более подробно гидротермические расчеты и исходные данные для них приведены в специальной литературе [118, 124 и др.].

Потери на испарение

Тепло, поступающее в пруд с оборотной водой, омывающей теплообменники, рассеивается путем испарения и конвекции с активной зоны водоема.

Для расчета потерь на испарение при установившемся режиме используется уравнение теплового баланса (со среднемесячными значениями входящих в него элементов)

$$A(e_м-e'_м)+B(k_1t_{ср}-t_e)=q-\Delta I, \qquad (67)$$

где q — тепловая нагрузка, т. е. количество тепла, поступающего с предприятия на активную (охлаждающую) площадь водохрани-

лица, ткал/м² · сут. (для каждого месяца); $\Delta I = M(k_1 t_{ср} - t_е)$; $e_м$ и $e'_м$ — относятся соответственно к $t_{ср}$ и $t_е$. Остальные обозначения прежние.

Величина $t_{ср}$ и соответствующая ей $e_м$ находятся подбором при всех прочих известных величинах в формуле (67), в которой слагаемое с коэффициентом A относится к испарению, а с коэффициентом B — к конвекции.

Поскольку 1 л воды соответствует слою воды в 1 мм на площади 1 м², то испарение определится, если слагаемое, дающее величину расхода тепла путем испарения, разделить на скрытую теплоту парообразования (0,590 ткал/л). Учитывая также формулы (65) и (67), получаем:

1) высоту естественного испарения в мм/сут. (со всей площади водоема)

$$h_е = 0{,}39\,(1 + 0{,}135 w_{2,0})\,(e'_м - e); \qquad (68)$$

2) высоту дополнительного испарения в мм/сут. (с площади активной зоны)

$$h_д = 0{,}39\,(1 + 0{,}135 w_{2,0})\,(e_м - e'_м). \qquad (69)$$

Формулы (65—69) широко применяются в Теплоэлектропроекте [118]. Кроме них, известны и другие формулы и методы расчета испарения (см. § 8).

Пример. Определить потери на испарение из пруда с общей площадью 9,95 млн. м² и активной площадью 6,25 млн. м² при известном циркуляционном расходе Q и других данных, приведенных в табл. 64.

Таблица 64

Данные для расчета испарения из пруда

Месяц	$\Delta t°$	e мм	$w_{2,0}$ м/с	$t°_е$	$t°_2$	Q м³/ч
Июль	8,6	11,2	1,6	21,6	26,6	171 240
Январь	11,0	1,83	2,2	—12,0	0,00	120 000

Примечание. Для зимы естественная температура воды принимается равной температуре воздуха, т. е. имеет отрицательное значение и является условной расчетной величиной, причем температура забираемой воды $t_2 = 0$ (у кромки льда), а $t_1 = t_2 + \Delta t = \Delta t$.

Для июля: при $t_е = 21{,}6°$, $e'_м = 19{,}35$ мм; $h_е = 0{,}39 \cdot 31\ (1 + 0{,}135 \times 1{,}6) \cdot (19{,}35 - 11{,}2) = 120{,}2$ мм/мес. По формуле (66) определяем температуру активной зоны

$$t_{ср} = 12{,}6 + \frac{(26{,}6 + 8{,}6) - 26{,}6}{\ln \frac{35{,}2 - 21{,}6}{26{,}6 - 21{,}6}} = 30{,}2°,$$

которой соответствует $e_м = 32{,}19$ мм рт. ст. При этом $h_д = 0{,}39 \times \times 31(1+0{,}135 \cdot 1{,}6) \cdot (32{,}19 - 19{,}35) = 189{,}4$ мм/мес. Всего $E = = 0{,}1202 \cdot 9{,}95 \cdot 10^6 + 0{,}1894 \cdot 6{,}25 \cdot 10^6 = 2{,}38 \cdot 10^6$ м³/мес.

Для января: $h_е = 0$ (в естественных условиях пруд покрыт льдом). Температура активной зоны равна

$$t_{ср} = -12 + \frac{11}{\ln \frac{11+12}{0+12}} = 4{,}9°,$$

ей соответствует $e_м = 6{,}50$ мм. рт. ст. При этом $h_д = 0{,}39 \cdot 31(1+ +0{,}135 \cdot 2{,}2)(6{,}50 - 1{,}83) = 73{,}2$ мм/мес. Для определения объема потерь найдем площадь пруда, свободную от льда при $t_1 = 11{,}0°$, $t_2 = 0$, $t_е = -12°$ и $w_{2,0} = 2{,}2$ м/с.

По кривой падения температуры (рис. 74) $\omega_{уд} = 2{,}15$ м²/м³ · сут., причем искомая площадь равна $\Omega_0 = \omega_{уд} \sum Q = 2{,}15 \cdot 24 \cdot 120\,000 = = 6{,}19 \cdot 10^6$ м², а объем потерь в январе равен

$$И_д = 0{,}0732 \cdot 6{,}19 \cdot 10^6 = 0{,}45 \cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{мес}.$$

§ 28. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ВОДОХРАНИЛИЩА И МОЩНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (ПО ВОДНЫМ РЕСУРСАМ)

Поскольку в первой схеме пруд-охладитель и водохранилище-регулятор обособлены, то выбор ГМО и НПГ водохранилища в этом случае ничем не отличается от случаев обычного регулирования стока для целей водоснабжения промышленных предприятий или населенных мест. Поэтому первая схема здесь подробно не рассматривается, а выбор параметров водохранилища приводится лишь для второй, комбинированной схемы водообеспечения электростанций при регулировании стока.

В первой схеме ГМО для водохранилища-регулятора определяется по обычным условиям (заиление, санитарно-технические условия, возможности водозабора и т. п.) и рассматривается независимо от НПГ. Емкость водохранилища связывается с мощностью ГРЭС лишь величиной необходимой полезной отдачи, определяемой в зависимости от мощности установки.

Иначе производится выбор параметров водохранилища при водообеспечении ГРЭС по второй, комбинированной схеме. В этом случае выбор ГМО, определение НПГ и назначение возможной мощности взаимно связаны и не могут рассматриваться независимо. Поэтому при комбинированной схеме общий объем водохранилища (или НПГ), его полезная отдача и мощность ГРЭС определяются одновременно.

Определение параметров водохранилища и мощности ГРЭС сводится к технико-экономическому выбору этих элементов из расчета по вариантам. Порядок расчета упомянутых показателей по рассматриваемой схеме регулирования стока и водоснабжения ГРЭС состоит в следующем.

С помощью кривых объемов и площадей водохранилища назначаются 3—5 вариантов ГМО, для которых по ряду коэффициентов регулирования (например, от $\alpha=0{,}50$ до $\alpha=0{,}75$ с делениями через $\Delta\alpha=0{,}05$) определяются рабочий объем, общий объем, НПГ, площадь при НПГ, полезная отдача и расчетные значения летней отметки уровня воды $Z_л$ и летней площади зеркала (общей и активной), относящиеся к наиболее жаркому месяцу в последнем году сработки водоема. Обычно это отметки в июле или августе, которые наблюдаются на полгода раньше сработки до ГМО.

Расчетные летние отметки и соответствующие им площади зеркала определяются на основе табличных расчетов полезной отдачи по каждой комбинации α и ГМО, причем одновременно выявляется и ход сработки водохранилища.

Запись результатов производится в форме табл. 65.

При анализе полученных результатов необходимо обратить внимание на следующее:

а) в приращении полезной отдачи $A_п$ с повышением коэффициента регулирования α при данном ГМО, согласно § 14, должна наблюдаться известная закономерность;

б) с повышением ГМО при неизменном коэффициенте регулирования полезная отдача уменьшается в связи с увеличением потерь при повышении ГМО;

в) с изменением α при неизменном ГМО летняя площадь зеркала остается практически постоянной (а потому может быть не связанной с α) и зависит только от ГМО. Это позволяет для каждого варианта ГМО сделать по одному табличному расчету сработки водохранилища (по примеру табл. 30) для некоторого среднего коэффициента регулирования и установить летнюю отметку уровня воды, соответственную площадь зеркала и активную площадь.

Если активные площади получены для нескольких комбинаций α и ГМО, то для остальных из них эти площади определяются интерполяцией. Если площадь $\omega_т$ и соответствующий ей коэффициент ψ получены при средних значениях α и ГМО, то для всех остальных значений α и ГМО активная летняя площадь $\omega_а$ приближенно определяется умножением общей летней площади $\omega_{пр}$ на полученный коэффициент ψ с выборочной проверкой результатов путем построения плана течений.

Площадь активной зоны зависит от месторасположения водозабора и выпуска воды с электростанции в водоем, от ширины выпуска и от искусственных сооружений в пределах пруда, вызывающих расширение потока (например, струераспределительные решетки и т. п.).

Важное значение имеет часто ширина выпуска (или струераспределительного расширения потока сразу же за сбросом воды в пруд): чем шире создается выпуск или струераспределение за ним, тем большее задается расширение потока в самом начале. Поэтому выпуски назначаются нередко шириной 50—75 м и более (равномерность выпуска на значительной ширине можно обеспечить,

Таблица 65

Водохозяйственные характеристики водохранилища ГРЭС

Площадь водосбора 963 км²; среднегодовой сток $Г_0 = 47{,}1 \cdot 10^6$ м³/год, $C_v = 0{,}53$, $C_s = 1{,}06$ доля меженного стока $n = 0{,}40$

Коэффициент регулирования α	Полезный объем $V_п$, 10^6 м³	ГМО = 26,0 м; $F_{м.\,о} = 5{,}55$ км²; $V_{м.\,о} = 19{,}2 \cdot 10^6$ м³						ГМО = 27,0 м; $F_{м.\,о} = 6{,}6$ км²; $V_{м.\,о} = 25{,}3 \cdot 10^6$ м³					
		НПГ м	общий объем $V_о$, 10^6 м³	площадь зеркала при НПГ, км²	полезная отдача $A_п$, 10^6 м³/год	летняя отметка $Z_д$, м	летняя площадь ω (общ/акт), км²	НПГ м	общий объем $V_о$, 10^6 м³	площадь зеркала при НПГ, км²	полезная отдача $A_п$, 10^6 м³/год	летняя отметка $Z_д$, м	летняя площадь ω (общ/акт), км²
0,50	23,3	29,3	42,5	8,5	13,0	27,05	6,6 / 3,60	29,9	48,6	9,22	11,4	28,0	7,4 / 4,07
0,55	28,1	29,8	47,3	9,1	15,1	27,1	6,7 / 3,64	30,4	53,4	10,0	13,5	28,05	7,45 / 4,10
0,60	34,2	30,4	53,4	10,0	16,9	27,15	6,75 / 3,68	31,0	59,5	10,8	15,3	28,1	7,5 / 4,13
0,65	41,8	31,2	61,0	11,2	18,6	27,2	6,8 / 3,72	31,7	67,1	12,2	17,1	28,15	7,55 / 4,16
0,70	51,4	32,0	70,6	12,8	20,2	27,25	6,85 / 3,76	32,5	76,7	13,5	18,6	28,2	7,6 / 4,19
0,75	63,9	32,9	83,1	14,1	21,7	27,3	6,9 / 3,80	33,4	89,2	14,9	20,0	28,25	7,65 / 4,22

Коэффициент регулирования α	Полезный объем $V_п$, 10^6 м³	ГМО = 28,0 м; $F_{м.\ о}$ = 7,45 км²; $V_{м.\ о}$ = 32,5·10^6 м³						ГМО = 29,0 м; $F_{м.\ о}$ = 8,2 км²; $V_{м.\ о}$ = 40,5·10^6 м³					
		НПГ м	общий объем $V_о$, 10^6 м³	площадь зеркала при НПГ, км²	полезная отдача $A_п$, 10^6 м³/год	летняя отметка $Z_д$, м	летняя площадь ω (общ/акт), км²	НПГ м	общий объем $V_о$, 10^6 м³	площадь зеркала при НПГ, км²	полезная отдача $A_п$, 10^6 м³/год	летняя отметка $Z_д$, м	летняя площадь ω (общ/акт), км²
0,50	23,3	30,7	55,8	10,3	9,74	28,95	8,1 / 4,44	31,4	63,8	11,6	7,51	29,85	9,2 / 4,92
0,55	28,1	31,1	60,6	11,2	11,7	29,0	8,15 / 4,97	31,8	68,6	12,4	9,45	29,5	9,25 / 4,95
0,60	34,2	31,7	66,7	12,1	13,5	29,05	8,2 / 4,50	32,3	74,7	13,2	11,2	29,95	9,30 / 4,98
0,65	41,8	32,3	74,3	13,2	15,2	29,1	8,25 / 4,53	32,8	82,3	14,0	13,0	30,0	9,35 / 5,00
0,70	51,4	32,9	83,9	14,1	16,8	29,15	8,3 / 4,55	33,4	91,9	14,9	14,7	30,05	9,4 / 5,03
0,75	63,9	33,7	96,4	16,0	18,1	29,2	8,35 / 4,58	34,1	104	17,5	16,1	30,1	9,45 / 5,06

Примечание. Фильтрация из водохранилища 18% объема в год; испарение от 683 до 611 мм/год; отметки условные.

например, переливом через водосливную стенку из успокоительного бассейна или изливом из отверстий вдоль трубы).

Глубина воды непосредственно за выпуском и изменение глубин, особенно на начальном участке потока, также оказывают влияние на величину активной площади: мелководный участок со слабым нарастанием глубин вызывает быстрое расширение потока, и наоборот, если выпуск расположен в месте с быстрым нарастанием глубин, то транзитный поток на большой длине тянется узкой полоской, занимающей небольшую площадь.

Понятно, что чем больше активная площадь, тем бóльшую мощность может обеспечить водоем по условиям охлаждения. В связи с этим непременным элементом водохозяйственного проектирования для ГРЭС являются гидротермические расчеты.

При рассматриваемой мощности, активной площади и расчетной естественной температуре воды требуется, чтобы расчетная температура у водозабора t_2 при работе ГРЭС не превышала 33° С (по техническим условиям, см. ГОСТ 3618-47 на турбины и ГОСТ 533—51 на турбогенераторы). В некоторых случаях предельная величина t_2 указывается турбинным заводом.

Расчет производится по графику (см. рис. 75). В ответственных случаях необходим расчет по тепловому балансу для наиболее неблагоприятного сезона.

В результате по всем вариантам летних отметок в качестве предельных мощностей, обеспеченных по охлаждению циркуляционной воды, принимаются такие мощности, для которых кратковременная температура воды у водозабора t_2 при расчетной максимальной естественной температуре воды будет не более 33° С.

Затем по летним отметкам, зависящим от вариантов ГМО, и по найденным предельным мощностям строится линия связи $N = \varphi$ (ГМО при $t_2 = \text{const}$), представленная на рис. 76. Эта кривая соответствует конкретным условиям, принятым при построении плана течений (расположение выпуска, ширина его, наличие искусственных сооружений по расширению потока и т. п.). С изменением условий кривая перемещается вправо, если новые условия способствуют увеличению активной площади, и влево — при обратных условиях.

Изменение гидротермических характеристик и мощностей ГРЭС при различных ГМО показано в табл. 66.

Наряду с этим производится расчет безвозвратного водопотребления ГРЭС, которое определяется для какой-нибудь конкретно установленной мощности ГРЭС и затем пересчитывается на один агрегат (или на единицу мощности). По этим удельным расходам легко находится безвозвратное водопотребление для любой установленной мощности (пропорционально ее величине).

Зная полезные отдачи для различных комбинаций α и ГМО, можно определить и соответствующие мощности ГРЭС, обеспеченные по водным ресурсам.

Для наглядности результаты этих расчетов следует представить графически в виде кривых (рис. 76), построенных по данным

Таблица 66

Гидротермические характеристики водохранилища при работе ГРЭС (расчетная естественная температура воды $t_e = 25°$ С, кратность охлаждения $m = 67{,}0$)

Горизонт мертвого объема, м . . .	26	27	28	29
Летняя отметка уровня воды, м . .	27	28	29	30
Активная летняя площадь, км² . .	3,61	4,13	4,56	5,11
Циркуляционный расход, м³/с . . .	39,0	44,6	50,2	55,8
Удельная активная летняя площадь, м²/м³·сут	1,07	1,07	1,05	1,06
Установленная мощность, тыс. кВт	700	800	900	1000
Расчетная максимальная температура воды у водозабора $t_2°$ С . .	32,3	32,3	32,5	32,4

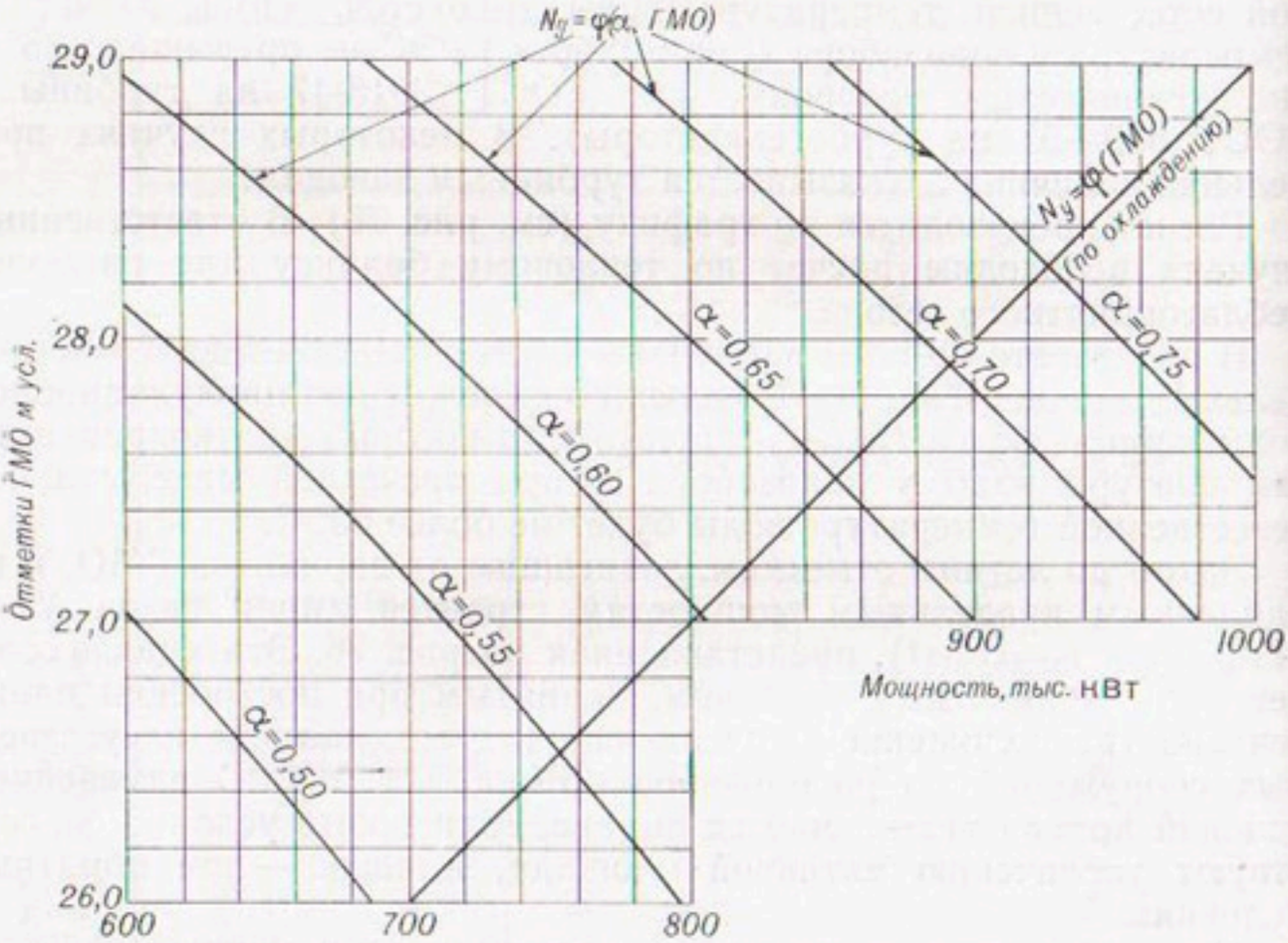


Рис. 76. Водохозяйственные и гидротермические характеристики водохранилища ГРЭС.

табл. 65. Для этого произведем следующий расчет. Если, например, станция оборудована турбинами мощностью 100 тыс. кВт каждая, безвозвратно расходующими, согласно подсчетам, по 1,9 млн. м³/год (или 19 м³/кВт год), то для одного и того же коэффициента регулирования стока α можно определить величины мощностей, обеспеченных полезной водоотдачей при разных ГМО, по выражению $N = A_п : 19$ кВт. При этом получаем серию кривых (по количеству коэффициентов регулирования), связывающих мощности N, полезную водоотдачу $A_п$ (для данного α) и ГМО. Понятно, что при малом α и высоком ГМО обеспеченная мощность

будет незначительна по водным ресурсам и велика по охлаждению. Наоборот, при высоком α и низком ГМО обеспеченная мощность по наличию воды оказывается большой, а по охлаждению — незначительной.

На рис. 76 видно, что для увеличения мощности (при заданных условиях к построению плана течений) необходимо повышение ГМО. При этом требуется также повышение коэффициента регулирования не только для покрытия нарастающего водопотребления, но и в связи с увеличением потерь из водоема.

Задача определения обеспеченной мощности ГРЭС сводится к выбору такой комбинации α и ГМО, а значит, и всех прочих параметров водохранилища, при которых мощность удовлетворяется одновременно как по водным ресурсам, так и по охлаждению. Этот выбор облегчается, если результаты расчетов и построений представлять в систематическом виде, в форме табл. 62 и 63 и графиков (рис. 76).

Таким образом, при регулировании стока для тепловых электростанций водохозяйственные и гидротермические показатели и мощности ГРЭС определяются в следующем порядке:

а) назначаются варианты ГМО (исходя из приближенной оценки летней площади зеркала и активной зоны для каждого варианта). Желательно, чтобы число вариантов ГМО было три или пять;

б) выполняются водохозяйственные расчеты для каждого ГМО по ряду коэффициентов регулирования (с градацией на $\Delta\alpha = 0{,}05$) и определяются V_0, НПГ, $A_п$, $Z_л$, $\omega_{пр}$ и т. п., так же, как в табл. 65. Для упрощения полезная отдача $A_ц$, летняя отметка уровня $Z_л$ и соответствующая ей площадь зеркала $\omega_{пр}$ находятся точно для наименьшего, среднего и наибольшего коэффициентов регулирования по крайним ГМО, если их три варианта, и по трем ГМО (крайним и среднему), если их пять вариантов. Для промежуточных вариантов α и ГМО величины $A_п$, $Z_л$, $\omega_{пр}$ находятся интерполяцией;

в) строятся планы течений для опорных значений ГМО при отметках $Z_л$ и определяются летние активные площади. По промежуточным вариантам ГМО активные площади устанавливаются также интерполяцией;

г) по графику для гидротермических расчетов (см. рис. 75) определяется необходимая удельная активная площадь (а следовательно, и мощность ГРЭС), достаточная для того, чтобы температура воды у водозабора по всем расчетным отметкам $Z_л$ была более или менее одинакова и не превышала 33° С;

д) по водохозяйственным и гидротермическим характеристикам строятся линии связи установленных мощностей $N_у = \varphi$ (α, ГМО) и $N_у = \varphi$ (ГМО) (рис. 76).

Однако выполненные расчеты и построения все же не дают окончательного решения относительно выбора установленной мощности. Так, например, на рис. 76, совмещающем водохозяйственные и гидротермические характеристики водохранилища, можно

выбрать следующие три варианта мощности, обеспечиваемые и количеством воды и охлаждением ее (при мощности одного агрегата 100 тыс. кВт): при $\alpha=0{,}51$ и ГМО$=26$ м $N=700$ тыс. кВт, при $\alpha=0{,}60$ и ГМО$=27$ м $N=800$ тыс. кВт, при $\alpha=0{,}71$ и ГМО$=28$ м $N=900$ тыс. кВт.

Отметим, что остальные параметры водохранилища и показатели регулирования стока, соответствующие этим выборочным значениям α и ГМО, а именно общий объем, НПГ, площадь зеркала и т. п., находятся непосредственно из данных табл. 65.

Для промежуточных выборочных значений α или ГМО, отсутствующих в таблице, недостающие характеристики восполняются расчетом. В данном случае водохозяйственными расчетами следует восполнить сведения, относящиеся к $\alpha=0{,}71$ при ГМО$=28$ м, так как в нашем примере эти величины принимаются за окончательные и являются предельными для мощности ГРЭС. В самом деле, поставить еще одну турбину на этой ГРЭС нельзя, так как потребовалось бы повышение ГМО до отметки 29,0 м и коэффициента регулирования до $\alpha>0{,}85$, что в свою очередь вызвало бы значительное увеличение размеров водохранилища.

Поэтому наряду с определением обеспеченных мощностей и соответствующих им параметров водохранилища производится расчет экономичности работы ГРЭС. При этом учитывается потребность энергии на подачу охлаждающей воды, ежемесячные расходы пара или вакуумы в конденсаторах при средних по месяцам за многолетие естественных температурах воды, уровнях и площадях водохранилища и скоростях ветра. В данном случае такие расчеты следует произвести для трех выбранных вариантов обеспеченных мощностей с тем, чтобы выявить преимущества каждой из них.

В дополнение к этому необходимо учитывать еще и ряд других технико-экономических требований, указанных в § 6.

Таким образом, выбор параметров водохранилища и мощности по совмещенной схеме регулирования стока и технического водоснабжения ГРЭС производится на основе совместного рассмотрения:

1) вариантов обеспеченных мощностей и соответствующих им параметров водохранилища, гарантирующих надежность работы ГРЭС по водным ресурсам и по охлаждению конденсаторов;

2) показателей эксплуатационной экономичности работы ГРЭС за многолетие при средних температурах воды и средних уровнях водохранилища (по вариантам мощностей);

3) технико-экономических данных [общие водохозяйственные и гидротехнические требования и стоимостные показатели (см. § 6), возможные варианты пруда и схемы прудового охлаждения воды, высотное и плановое размещение площадки ГРЭС и ее служб при этих вариантах и схемах, величина мощности ГРЭС с учетом возможностей ее перспективного расширения и т. д.].

В примере, указанном на рис. 76, на основе учета всех полученных показателей и требований окончательно установленная мощность (с соответствующими ей параметрами водохранилища) принята равной 900 тыс. кВт.

§ 29. РОЛЬ МЕРТВОГО ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Мертвый объем в расчетах отдачи водохранилища ГРЭС приурочивается к концу сработки регулирующей емкости (перед весной), но определяется по условиям охлаждения конденсаторов в летнем месяце последнего года сработки водохранилища (примерно на полгода ранее конца сработки). Таким месяцем является тот, на который приходится малая площадь зеркала и высокая температура воды.

Мертвый объем водохранилища ГРЭС обычно в несколько раз больше объема заиления за длительный период.

Однако летом нужна площадь зеркала для охлаждения, но не требуется значительная емкость ниже ГМО. Зимой же не требуется большая площадь, но может быть использована емкость, так как перебои в отдаче водохранилища обычно наступают не с весны, а к концу водохозяйственного года, в холодные месяцы (сентябрь—февраль).

Кроме того, поскольку в холодный период года санитарно-технических ограничений для глубин соблюдать не следует, то и с этой точки зрения на случай перебоя и для устранения его также можно говорить о сработке водохранилища ниже ГМО до некоторого предельно низкого минимального горизонта воды (МГВ).

Вся емкость между ГМО и МГВ может рассматриваться как резерв для повышения водообеспеченности ГРЭС без увеличения общей емкости водохранилища. При этом возможны следующие случаи использования этого резерва за пределами расчетной обеспеченности $P=97\%$ (после исчерпания рабочей емкости) и особенно в пусковой период.

1. Полное исчерпание рабочей емкости водохранилища (т. е. перебой) наступает в пределах второго водохозяйственного полугодия с пониженными температурами (сентябрь—февраль). Дефицит воды покрывается указанным резервом, и ГРЭС не испытывает ограничений ни по количеству воды, ни по охлаждению конденсаторов.

2. Перебой захватывает теплое время года, например с марта по август. Если при этом температура воздуха (и воды) не очень высока или высокая температура удерживается недолго, то ГРЭС также не испытывает никаких ограничений, если в наличии имеется вышеупомянутый резерв.

3. Как и в предыдущем случае, перебой в воде перемещается или охватывает длительный период, например интервал в пределах семи месяцев (август—февраль) и более. С перебоем по водоотдаче совпадает в августе редкая по обеспеченности расчетная температура воды. Однако даже в этих условиях, если резерв еще не весь исчерпан, будет наблюдаться только ограничение мощности по охлаждению (в связи с уменьшившейся площадью зеркала), но вовсе не полная остановка ГРЭС, что имело бы место из-за недостатка воды во всех указанных трех случаях при отсутствии

названного резерва. При этом в условиях обычного заглубления береговых насосных станций дополнительное заглубление их на небольшую величину (табл. 67) не может являться лимитирующим фактором.

Таблица 67

Характеристика мертвых объемов по водохранилищам тепловых электростанций

Водохранилище	Проектный объем заиления за 30 лет, 10^6 м^3	Принятый мертвый объем по охлаждению и другим условиям, 10^6 м^3	Избыточный объем (3)—(2)		Слой воды для избыточных объемов по графе (4), м
			10^6 м^3	% рабочей емкости	
1	2	3	4	5	6
М-ГРЭС	2,8	7,7	4,9	38,4	3,0
Б-ГРЭС	6,0	16,4	10,4	37,7	3,0
З-ГРЭС	4,6	10,6	6,0	20,6	1,0
А-ГРЭС	11,3	29,0	17,7	52,0	3,1
К-ГРЭС	5,2	11,2	6,0	15,0	1,1

Бояться сработки резерва (ниже ГМО) не следует, так как при наступлении перебоя ГРЭС вынуждена будет перейти к сработке этого резерва. Если такая сработка не была предусмотрена в конструкциях, она повлечет за собой тяжелые последствия в работе сооружений и оборудования или просто окажется невозможной. Это вызовет остановку ГРЭС, хотя в водохранилище еще имеется большое количество воды. В табл. 67 приведены данные мертвых объемов водохранилищ нескольких ГРЭС, из которых видно, что принятые по условиям охлаждения мертвые объемы при ГМО больше объемов при МГВ на 4,9—17,7 млн. м^3, если за последние принять отметки заиления. Эти избытки весьма велики (достигают 40—50% рабочей емкости) и частично или полностью могут быть использованы в качестве резервных объемов.

По данным табл. 67, для равнинных условий высота слоя водохранилища (над МГВ), вмещающая упомянутые резервные объемы, составляет всего лишь 1—3 м, что является благоприятным также и для режима работы насосов в рассматриваемых редких критических случаях работы. Правда, при этом иногда насосы будут работать в кавитационном режиме, однако такие случаи редки, и влияние кавитации можно устранить или уменьшить подбором соответствующего оборудования [1] и заглубления насосов.

Практика эксплуатации одной ГРЭС на Украине показывает безусловную целесообразность водохозяйственного использования мертвого объема как резерва, что побудило рассмотреть вопрос о внутренних возможностях водохранилищных ГРЭС с целью повышения их водообеспеченности [82].

[1] Например, установка насосов с поворотными лопатками, угол наклона которых можно изменить при понижении уровня водоема в указанных редких случаях.

§ 30. РЕЖИМ РАБОТЫ ВОДОХРАНИЛИЩА И ГРЭС В ПУСКОВОЙ ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ М-ГРЭС)

В бассейне реки Х построена ГРЭС сравнительно большой мощности при циркуляционно-прудовом охлаждении конденсаторов. Поскольку река Х отличается резкой неравномерностью стока (обычно многоводная весна и почти полное пересыхание реки летом), водоснабжение ГРЭС обеспечивается путем регулирования речного стока водохранилищем, совмещенно выполняющим функцию регулятора стока и функцию пруда-охладителя.

Параметры стока и водохранилища следующие: площадь водосбора 289 км², среднегодовой приток в водохранилище 18,2 млн. м³, приток за маловодный год с обеспеченностью $P=97\%$ 4,46 млн. м³, доля меженного стока в годовом $m=0{,}40$, коэффициент вариации годового стока $C_v=0{,}55$, коэффициент регулирования стока $\alpha=0{,}62$, общий объем при НПГ 20,5 млн. м³, мертвый объем 7,72 млн. м³, полезная отдача водохранилища с обеспеченностью $P=97\%$ 7,24 млн. м³/год, водопотребление ГРЭС (вместе с потерями от подогрева воды) 7,24 млн. м³/год.

Хотя водное хозяйство ГРЭС не имеет очевидных запасов (водоотдача равна водопотреблению), тем не менее потребности ГРЭС в воде полностью покрываются при многолетнем регулировании и с высокой вероятностью обеспечения ($P=97\%$). Вместе с тем при использовании в качестве дополнительного резерва части мертвого объема для ГРЭС сокращается возможность перебоев при стечении неблагоприятных обстоятельств и тем самым, по существу, повышается обеспеченность водопользования сверх 97%.

Весной 1953 г. была возможность заполнить водохранилище до НПГ (рис. 77). Однако при недостаточной готовности гидросооружений щит водосброса в половодье все время был открыт. В результате к концу весны горизонт водохранилища установился на уровне порога водослива (89,5 м усл.) и было наполнено лишь 55% емкости водохранилища.

Монтаж первой турбины был закончен осенью 1953 г. Нормальная эксплуатация ее (после временных испытаний) была начата, когда уровень водохранилища был на отметке 88,94 м усл. Таким образом, водоем вступил в эксплуатацию незаполненным, что является одним из серьезных обстоятельств для водного хозяйства ГРЭС. В конце 1953 г. была введена в работу вторая турбина.

С момента пуска первой турбины до марта 1954 г. гидрозолоудаление (ГЗУ) на ГРЭС производилось по прямоточной (разомкнутой) схеме со сбросом гидропульпы в нижний бьеф плотины и без использования сброшенной воды из-за неготовности перекачивающей насосной станции. Это было второе серьезное обстоятельство, угрожавшее перебоем в работе ГРЭС из-за недостатка воды в связи с отклонением от проектного водопользования (при ограниченных водных ресурсах водопотребление ГРЭС подсчитано и запроектировано с учетом замкнутого гидрозолоудаления и с использованием возвратных вод и фильтрата в непрерывном цикле).

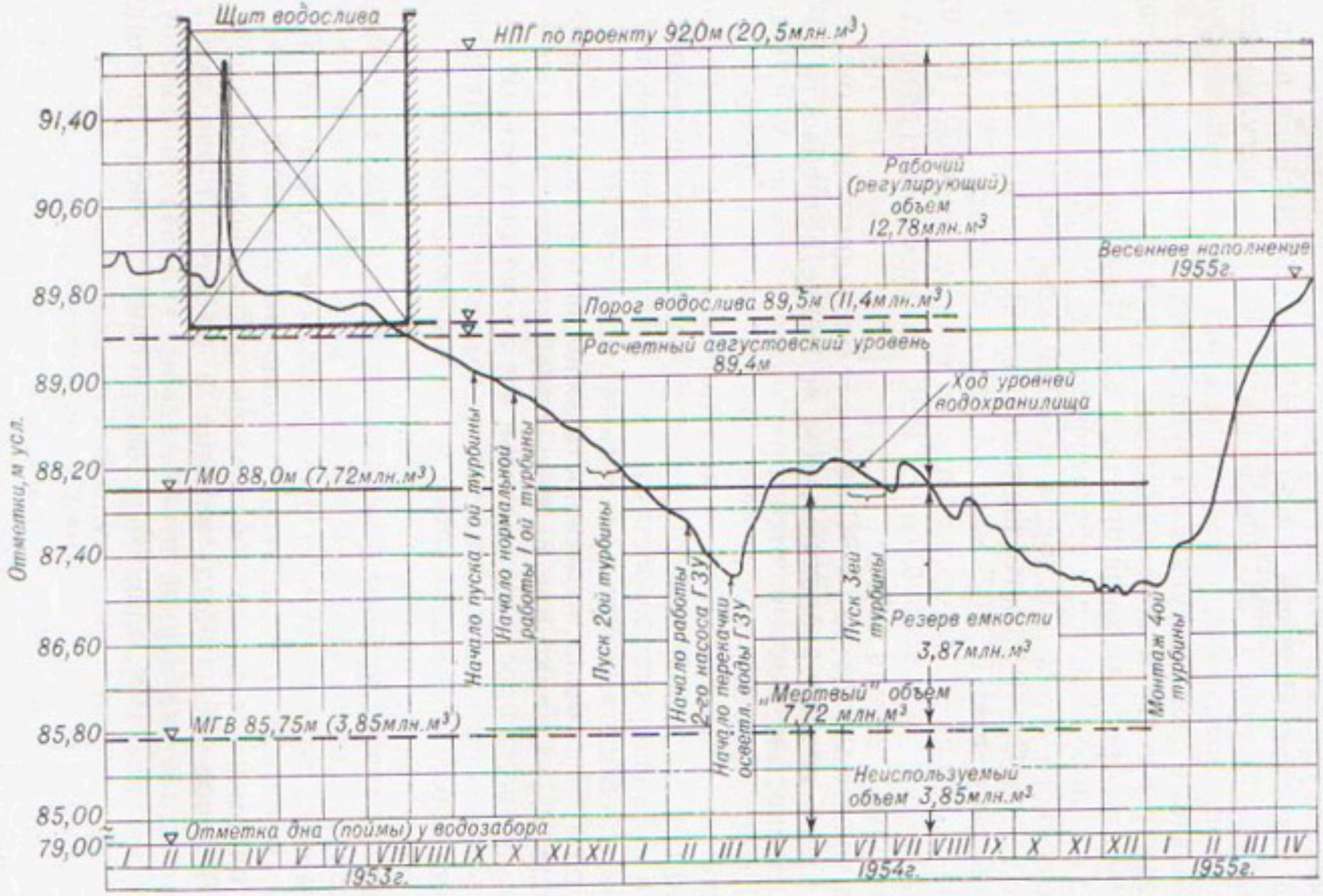


Рис. 77. Колебание уровней водохранилища М-ГРЭС в пусковой период 1953—1955 гг.

Таким образом, в связи с неготовностью насосной станции для возврата осветленной воды с золоотвала с сентября 1953 г. по март 1954 г., когда перекачивающая насосная станция была пущена, происходила систематическая потеря воды в нижний бьеф при удалении золы. В результате двух указанных причин уровень водохранилища к весне 1954 г. упал до отметки 87,16 м усл. (6,11 млн. м^3), т. е. на 0,84 м ниже ГМО.

Понятно, что эти причины, приведшие к незначительному резерву воды, можно было бы устранить. Если бы не были допущены указанные недочеты в пусковой период эксплуатации, то третье неблагоприятное обстоятельство, которое пришлось на пусковой период ГРЭС (исключительно маловодная весна 1954 г.), не могло бы привести к критическому состоянию водные ресурсы ГРЭС.

Половодье 1954 г., по прогнозу Гидрометслужбы, предполагалось выше средней водности. Фактически оно оказалось исключительно маловодным: повышение уровня, например, на малых реках Донбасса составило лишь 20—30 см от зимнего, а водохранилище М-ГРЭС едва наполнилось несколько выше ГМО.

В июне 1954 г. при стоянии уровня воды около ГМО вступила в работу третья турбина ГРЭС. Таким образом, при обостряющемся положении с водными ресурсами происходило наращивание мощности ГРЭС, которая с тремя единицами мощности в середине лета оказалась работающей при ГМО, причем и в дальнейшем предполагалось понижение уровня. Меженный сток, влияющий на обеспеченность отдачи, особенно при малом заполнении водохранилища, давал в этом году существенное пополнение водохранилища.

Все же только благодаря ранним зимним паводкам при оттепелях, начиная с декабря 1954 г., сработка мертвого объема не превысила 1,02 м и перебоя в работе ГРЭС не произошло. Без наличия этого резерва и без его использования М-ГРЭС дважды за пусковой период была бы вынуждена простаивать (в 1954 и 1954-55 гг.).

Имея же возможность использовать этот внутренний резерв, М-ГРЭС в состоянии:

а) работать без перебоя в тяжелых пусковых условиях;

б) устранять большинство перебоев (в пределах $P = 100 \div 97\%$) или максимально сокращать их продолжительность в установившихся условиях эксплуатации.

В течение 1953 и 1954 гг. не возникало ни гидротермических затруднений по охлаждению конденсаторов, ни водохозяйственных перебоев.

К 20/XII 1954 г. водохранилище имело отметку 87 м усл. и при использовании части мертвого объема М-ГРЭС к весне 1955 г. пришла в рабочем состоянии. Затем водохранилище обеспечивало четыре агрегата ГРЭС, работая выше ГМО до весны 1956 г., когда оно, наконец, заполнилось до НПГ.

Вопрос о допущении понижения уровней за пределы ГМО заслуживает внимания, так как большинство ГРЭС вводится в эксплуатацию примерно по описанной выше схеме. При этом имеют значение не только водохозяйственные и тепловые показатели пускового периода, но также: а) строительные условия, поскольку первые агрегаты часто вступают в строй при продолжающихся гидротехнических работах на низких отметках; б) режим установившейся эксплуатации: по условиям температуры воды и ее качеству желательно иметь конструкции, позволяющие использовать возможно бóльшую емкость водохранилища.

Большое значение указанного резерва, требующего небольших дополнительных затрат на сооружения, обусловливается своеобразием работы водохранилищ для ГРЭС и малой продолжительностью некоторых перебойных периодов.

Приведенные соображения, подкрепленные опытом пускового периода работы довольно крупной установки, следует учитывать при строительстве и эксплуатации ГРЭС, особенно при высоком регулировании стока.

Выводы

1. При достаточно высоком регулировании стока ($\alpha \geqslant \geqslant 0{,}55 \div 0{,}60$) заполнение водохранилища в течение одного половодья маловероятно. Оно может заполняться один-два года и более. Поэтому ГРЭС может вступать в работу при отсутствии начального заполнения водоема и оставаться без расчетной емкости довольно продолжительное время (например, два-три года), расходуя запасы и не получая необходимого пополнения. В результате период неустановившейся работы водохранилища до начального заполнения (пусковой период) является наиболее опасным в отношении перебоев и тем в большей мере, чем выше отдача α. Это не означает, что следует избегать высокого регулирования стока, надо не упускать из виду вероятность и длительность заполнения водоема как при выборе α, так и особенно при водохозяйственных мероприятиях в процессе строительства водохранилища и в пусковой период ГРЭС.

2. Для уменьшения риска перебоев в начальный период работы ГРЭС при высоком регулировании стока необходимо максимально содействовать ускорению заполнения водохранилища, т. е. сокращению пускового периода. Строительство плотины и подготовку сооружений следует увязывать с наполнением водоема. Должен быть продуман вопрос об удержании меженного стока, о захвате половодья, водопользовании в пусковой период, а также о последовательности ввода агрегатов и т. п. Недостаточное использование паводка для наполнения водохранилища во время пуска, откладывание заполнения на последующие годы, неплановое расходование воды (например, на гидрозолоудаление по прямоточной схеме вместо замкнутого цикла по проекту) — все

это приводит к недопустимой затяжке пускового периода и к увеличению риска перебоев до заполнения водоема.

3. Исключительно большую роль для ГРЭС представляет не только охладительное, но и водохозяйственное использование мертвого объема как резерва воды. Для использования в любых случаях возможно большего резерва целесообразно назначать отметку МГВ предельно низкой по гидротехническим условиям. Заглубление насосов, подводящего канала-прорези, водозаборных окон, концевых сбросов циркуляционной воды и других сооружений должно быть таким, чтобы при дефиците воды (после сработки до ГМО) допускалась возможность сработки водохранилища до МГВ [1].

4. Использование резерва емкости водохранилища ГРЭС между уровнем ГМО с расчетной обеспеченностью $P=97\%$ и чрезвычайным уровнем МГВ с $P>97\%$ повышает надежность (обеспеченность) водопотребления ГРЭС как в установившихся условиях многолетней эксплуатации, так и особенно в пусковой период (и даже в случае аварии плотины, нижняя часть которой может сохраниться или будет быстро восстановлена).

---

[1] Исключением могут быть случаи значительного дополнительного заглубления насосных станций, а также случаи в горных и полугорных условиях, при которых для ГМО решающими являются не гидротермические расчеты, а высота водоподъема: ГМО приближается к закрепленной отметке площадки ГРЭС. При этом на достаточно полное освоение мертвого объема для повышения обеспеченности работы ГРЭС ориентироваться нельзя и отметка МГВ назначается по техническим возможностям.

Глава X

РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ДЛЯ ГИДРОСТАНЦИЙ

§ 31. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ПАРАМЕТРЫ ГЭС И ЕЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Основные понятия

Гидроэлектростанция (ГЭС) производит электрическую энергию, используя механическую работу воды при переходе ее под напором из верхнего бьефа в нижний. Значит, для использования энергии потока необходимо в месте постройки ГЭС создать напор H — разность уровней воды выше и ниже ГЭС.

Существуют два основных типа ГЭС: 1) приплотинные и 2) деривационные (рис. 78, 79). Для первых напор H создается плотиной, около которой или даже в ее теле располагается ГЭС. В последние годы в теле плотины размещаются горизонтальные капсульные агрегаты ГЭС, имеющие повышенный к. п. д. в связи с минимальными гидравлическими сопротивлениями на вход и выход воды при спрямленной всасывающей трубе (Киевская ГЭС). Для вторых плотина устраивается выше по течению, а вода к ГЭС подводится по деривации — открытым каналом, тоннелем или трубопроводом. При этом напор создается разностью падения реки на участке, в обход которого устраивается деривация, и падения канала. Если плотина служит не только для отвода воды в канал, но и сама повышает напор, то такие установки иногда называют плотинно-деривационными.

Пройдя через турбины из верхнего бьефа в нижний (рис. 79), вода производит работу, равную γQH кгм/с, где γ — вес 1 м^3 воды, кг.

Технической единицей мощности, т. е. работы в единицу времени, является 1 кВт$\approx$102 кгм/с. Значит, мощность гидроэлектростанции в каждый момент определяется по зависимости

$$N=\frac{\gamma QH}{102}\eta_т\eta_г=9{,}81QH\eta_т\eta_г=AQH \text{ кВт}, \qquad (70)$$

где Q — расход, пропускаемый через турбины, м^3/с; H — полезный напор, определяемый как разность отметок верхнего и нижнего бьефов (с исключением потерь напора в подводящих сооружениях: решетках, трубопроводах и т. п.), при этом отметка верхнего бьефа находится по кривой объемов, а отметка нижнего —

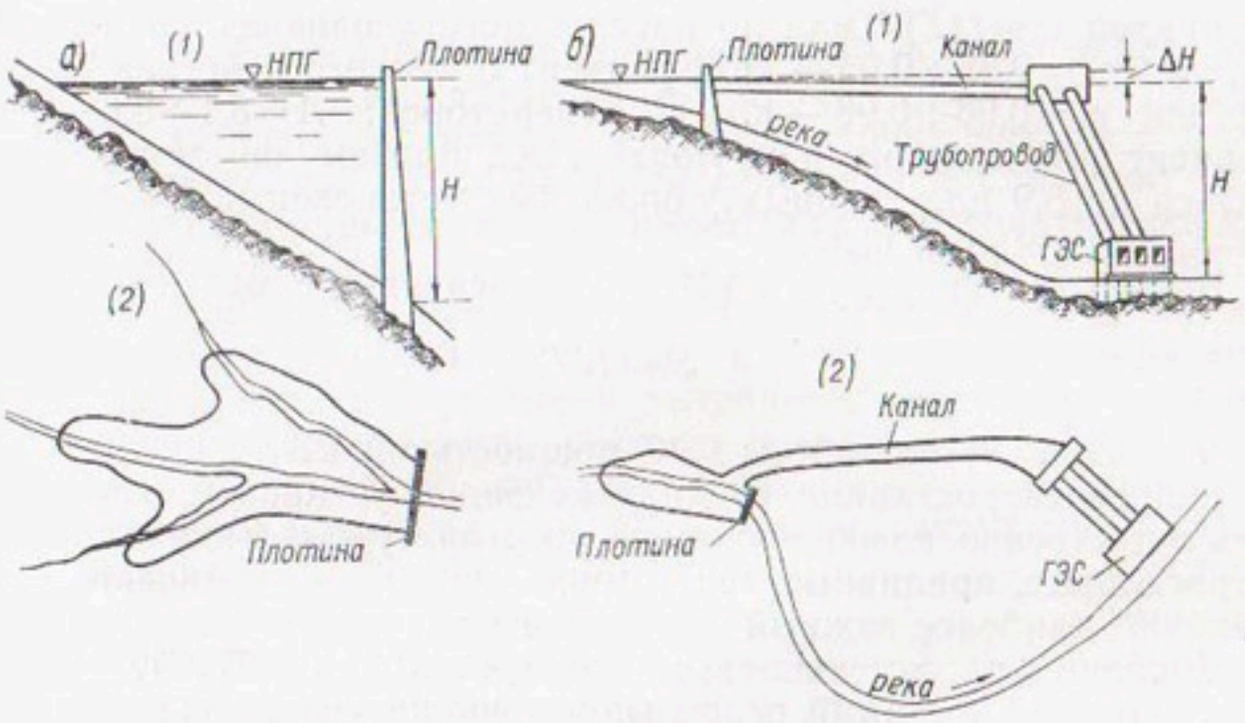


Рис. 78. Схема приплотинной (*а*) и деривационной ГЭС (*б*)

1 — продольный профиль, *2* — план.

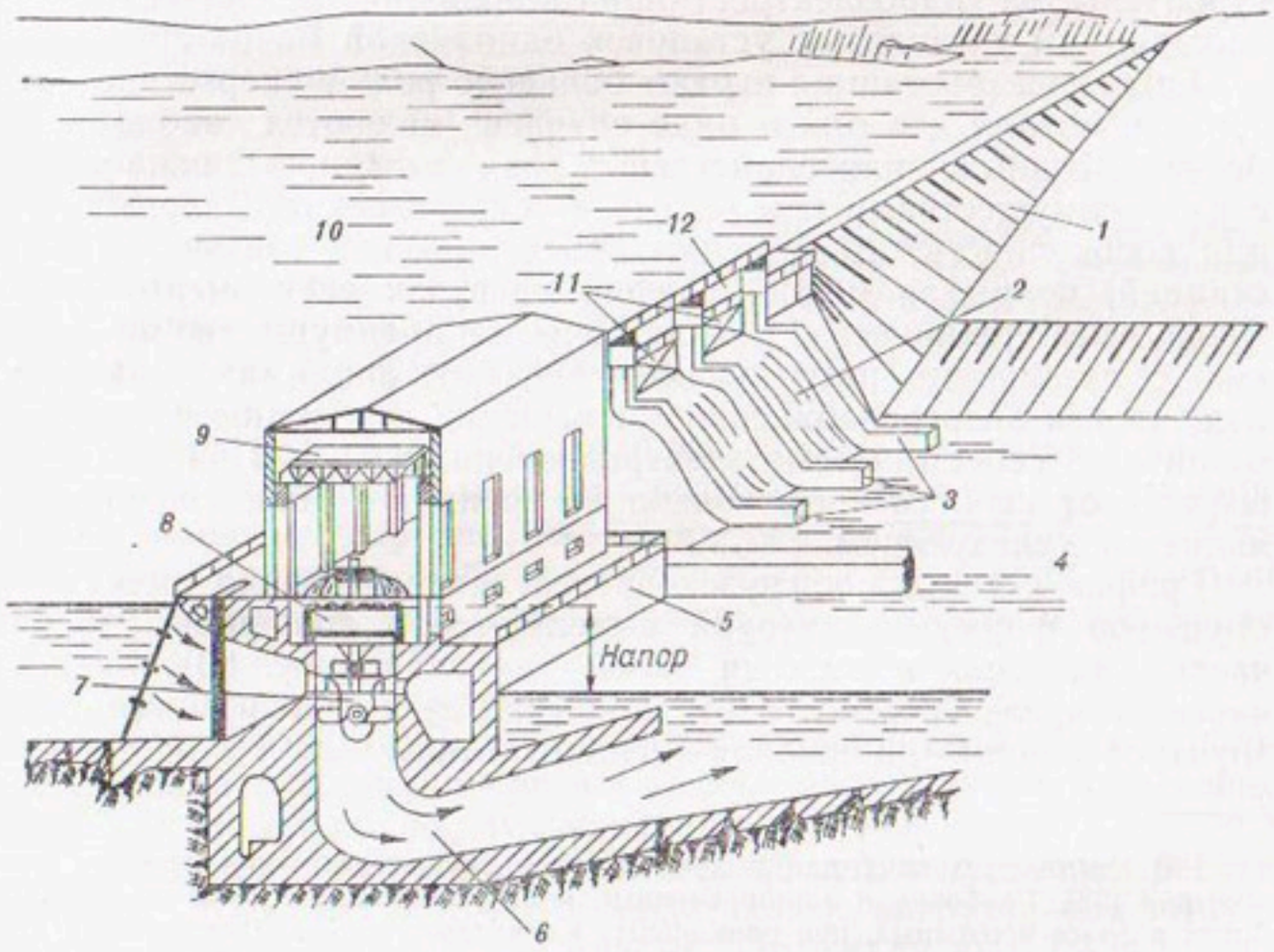


Рис. 79. Элементы приплотинной ГЭС.

1 — земляная плотина, *2* — водосливная бетонная плотина, *3* — бычки, *4* — нижний бьеф, *5* — здание ГЭС, *6* — всасывающая труба, *7* — турбина, *8* — генератор, *9* — мостовой кран, *10* — верхний бьеф, *11* — затворы, *12* — мост.

по кривой $Q=f(Z)$ [1] или по расчету неустановившегося движения потока; $\eta_т=0{,}85\div0{,}95$ — коэффициент полезного действия (к. п. д.) турбин; $\eta_г=0{,}96\div0{,}98$ — к. п. д. генераторов; $A=8{,}1\div8{,}6$ — коэффициент для средних и крупных ГЭС, причем он может повышаться до 8,9 для мощных уникальных установок и снижаться до 6,5—7,5 для малых ГЭС.

Выработка энергии (в кВт · ч) определяется по соотношению

$$Э=NT,$$

где T — число часов работы ГЭС мощностью N кВт.

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

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

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

Гидроэлектростанции играют большую роль в энергетике нашей страны, потому что они в ряде случаев являются экономически более выгодными или единственно возможными, а также в связи с их преимуществами при работе в энергосистеме. Энергосистема, или совокупность объединенных электрической связью электростанций, покрывая общий график нагрузок всех энергопотребителей, имеет техническое и экономическое преимущество по сравнению с независимо работающими электростанциями: повышение надежности энергоснабжения, уменьшение необходимой резервной мощности, себестоимости электроэнергии и т. п. При этом ГЭС выполняют свойственные только им функции, роль которых проявляется в следующем.

График суточных нагрузок энергосистемы обычно имеет пикообразную форму, в которой выделяются: сплошная нижняя часть — базисная и верхняя часть — пиковая (рис. 80). Базисная часть нагрузок энергосистемы покрывается в основном тепловыми электростанциями, а пиковая — гидроустановками.

---

[1] В зимних условиях для получения этой зависимости определяется длина полыньи [58]. Глубокие и малопроточные водохранилища, в отличие от неглубоких и более проточных, при одинаковых климатических и гидравлических условиях нижнего бьефа создают в нем более длинные полыньи. Длина полыньи зависит также от зимней температуры воздуха и может изменяться от величины, близкой к нулю, до нескольких километров. Уровни здесь от кромки льда до плотины находятся в подпоре. При этом зависимость $Q=f(Z)$ у плотины устанавливается с учетом «зимнего» коэффициента в створе кромки льда [12].

Неравномерная работа тепловых станций в пике нецелесообразна по ряду причин: длительный процесс введения агрегата в работу, затраты топлива на частую растопку котлов с последующим доведением их до рабочего состояния и т. д. Этих недостатков гидроэлектростанция не имеет; для нее практически безразлично, какую часть графика нагрузок покрывать, изменение ее мощности происходит просто и весьма оперативно (агрегат вводится в работу в течение 3—5 мин и бесполезных потерь энергии не вызывает). Случайные и аварийные нарушения в покрытии графика нагрузок энергосистемы устраняются ГЭС почти мгновенно, если на ней предусмотрены соответствующие запасы — резервы мощности (и воды на время ликвидации аварии).

В многоводные годы и сезоны года (например, в половодье) ГЭС переводится целиком или частично на равномерную в течение суток работу для покрытия базисной части графика нагрузок. При этом для покрытия пиковой части обычно необходима лишь часть тепловых агрегатов, а остальные отключаются на длительное время (с использованием его на плановый ремонт) или работают только по нескольку часов в сутки (рис. 81). В результате такой взаимозаменяемости функций гидравлических и тепловых станций энергосистема экономит топливо на тепловых установках в периоды повышенного стока.

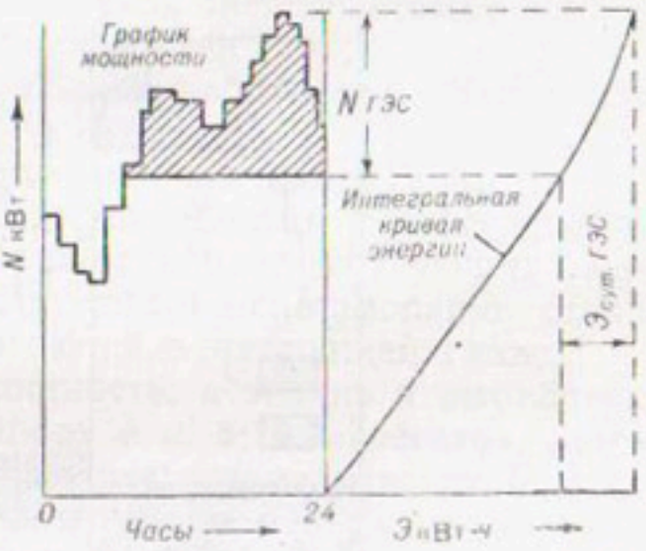


Рис. 80. Графическое определение обеспеченной части установленной мощности ГЭС с суточным регулированием.

Во время маловодья ГЭС, работая в пике, покрывает на графике нагрузок значительную его высоту (мощность) при ограниченной величине гидроэнергии. Этого она не смогла бы сделать, если бы ей пришлось работать независимо от тепловой установки и самой покрывать весь график нагрузки, включая и его базисную часть.

Остановимся на разновидности ГЭС — гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС), попеременно создающих, а затем использующих запасы водной энергии в высоко расположенном бассейне. ГАЭС обычно строят по двум причинам [14, 109].

1. Отсутствие или недостаточность бассейна суточного регулирования ГЭС, в связи с чем в часы низких нагрузок она вынуждена сбрасывать воду мимо турбин. При наличии ГАЭС этих сбросов можно не делать. На выработанной за их счет энергии обратимые моторно-насосные агрегаты ГАЭС перекачивают воду из нижнего бьефа в бассейн. В часы пика нагрузок эти агрегаты работают как турбогенераторы, срабатывая бассейн, причем ГАЭС,

дополняя мощности ГЭС, эффективно участвует в покрытии пика нагрузок. При достаточной емкости бассейна ГАЭС может выполнять и недельное и более длительное регулирование.

2. Потребность улучшить режим работы и энергоэкономические показатели ТЭС. Если энергии ГЭС не хватает, тепловые установки вынуждены покрывать полупиковую зону графика нагрузок, причем эксплуатация их усложняется, и значительно увеличивается удельный расход топлива на 1 кВт·ч. Потребляя энергию из сети в часы низких нагрузок и отдавая ее в часы пиков, ГАЭС создает дополнительную мощность, а заодно выравнивает режим ТЭС и улучшает их экономические показатели.

В связи с двойным преобразованием энергии, к. п. д. ГАЭС сравнительно невелик ($\eta_м\eta_н\eta_т\eta_г = 0{,}50 \div 0{,}65$). В сеть возвра-

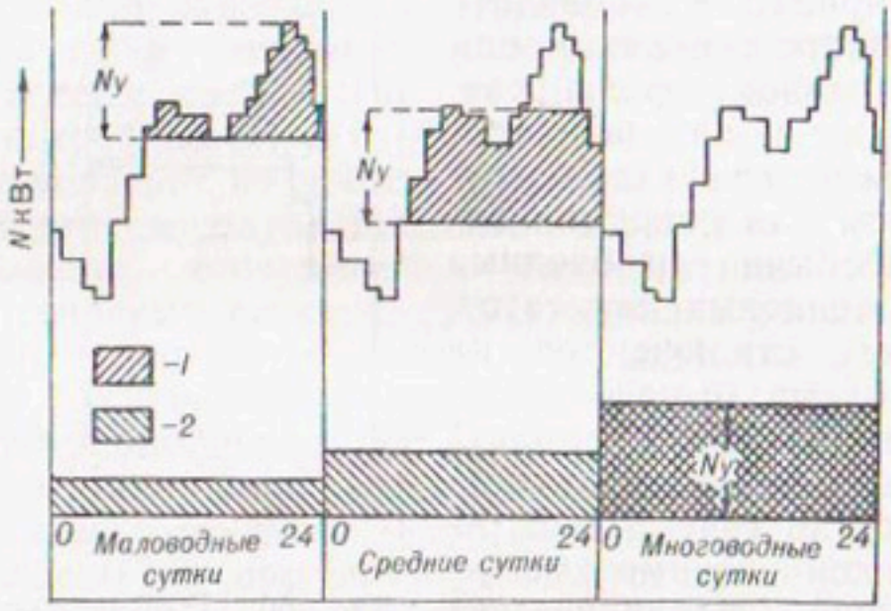


Рис. 81. Положение ГЭС с суточным регулированием и без него в графике нагрузок системы при различной водности реки.

1 — ГЭС с суточным регулированием, *2* — ГЭС без регулирования.

щается 50—65% энергии, взятой ночью из сети для работы ГАЭС. Но и при этом строительство ГАЭС в ряде случаев вполне оправдывается.

Некоторые насосные станции и ГЭС канала им. Москвы в годы Великой Отечественной войны работали в обратимом режиме ГАЭС. В качестве бассейнов использовались верхние бьефы ГЭС [12]. В последние годы построена ГАЭС, совмещенная с Киевской ГЭС, оборудованной обратимыми агрегатами. Запроектированы ГАЭС и для других энергосистем.

Таким образом, гидростанции повышают экономичность, оперативность и надежность работы энергосистем; тепловые и гидравлические установки выгодно дополняют друг друга. Понятно, что каждая ГЭС при этом имеется в виду как установка, экономически выгодная сама по себе.

Поэтому при проектировании ГЭС производится выбор наиболее целесообразных и экономичных ее параметров, оборудования

и правил эксплуатации с учетом работы в энергосистеме совместно с тепловыми станциями. Для этой цели производится:

а) выбор схемы использования реки и первоочередных гидростанций;

б) составление водохозяйственного баланса (сток, потери, водопотребление, емкостные характеристики водоема, заиление);

в) обоснование обеспеченности работы ГЭС и выбор характерных по водности лет или периодов;

г) выбор НПГ водохранилища ГЭС;

д) выбор глубины сработки водоема и режима регулирования стока;

е) выбор установленной мощности и оборудования ГЭС;

ж) определение выработки энергии и мощностей ГЭС с выявлением ее роли в покрытии графика нагрузок энергосистемы;

з) расчет энергоэкономических показателей ГЭС;

и) построение диспетчерских графиков работы водохранилища ГЭС;

к) выбор режима регулирования стока в каскаде ГЭС.

Некоторые из этих вопросов являются общими для всех водохозяйственных установок и рассмотрены в предшествующих главах, остальные, связанные с особенностями использования стока в гидроэнергетических целях, излагаются в настоящей главе.

Как видно из формулы (70), мощность, а значит и выработка ГЭС пропорциональны расходу, напору и к. п. д. агрегатов, который для каждого типа турбин в свою очередь зависит от Q и H.

Поскольку «продукцией» ГЭС являются не расходы воды (как во всех иных водоснабжающих установках), а мощности, то на ГЭС мы имеем дело с регулированием мощностей соответственно запросам энергопотребления. Если в упомянутых установках задача состоит в регулировании расходов воды, то в данном случае она сводится к регулированию произведений расходов на напоры, причем те и другие являются переменными и зависят от режима регулирования.

Однако влияние напора осложняет и изменяет зависимости, связывающие между собою параметры регулирования стока.

Зависимость напора от уровня верхнего бьефа ограничивает возможности регулирования стока для ГЭС. Сработка верхнего бьефа, в отличие от водоснабжающих установок, дает максимальный эффект только при известном ограничении используемой емкости. Дальнейшая сработка ее ведет к уменьшению энерговыработки в результате снижения напора. При этом громадный объем воды не используется и служит лишь для создания перепада уровней.

Связь напора с уровнем нижнего бьефа, зависящим от расхода воды здесь, означает, что на работу ГЭС влияет не только вода, прошедшая через турбины, но и холостые сбросы, которые при обилии воды приводят к снижению энергоотдачи из-за падения напора. В результате напор, обусловленный уровнями обоих бьефов, вместе с турбинным расходом воды определяют к. п. д. агрегатов, режим их работы и мощности ГЭС.

Гидроэлектростанция, работающая изолированно, должна в расчетный маловодный год самостоятельно покрывать местный график перспективных электрических нагрузок полностью или частично. Если ГЭС не в состоянии покрыть полностью этот график, то при наличии объема водохранилища для суточного регулирования она вливает свою энергию в верхнюю часть графиков суточных нагрузок (по характерным сезонам) с тем, чтобы для удовлетворения остальных не обеспеченных энергией электропотребителей требовалась возможно меньшая мощность от дополнительной электростанции, гидравлической или тепловой (см. рис. 80).

Согласно изложенному, роль ГЭС в энергосистеме сводится к тому, чтобы потребность в дополнительных тепловых мощностях была минимальной (что равноценно известному понятию вытеснения тепловых мощностей).

Степень покрытия графика нагрузок ограничивается мощностью ГЭС и запасом воды.

Электрическая мощность всех установленных на ГЭС агрегатов (с учетом агрегатов собственных нужд) называется *установленной* $N_у$. Она исчисляется по мощности генераторов в кВт при расчетном коэффициенте мощности $\cos\varphi$ (обычно $\cos\varphi=0{,}80$). Та часть установленной мощности ГЭС, которая не может быть уменьшена без добавления такой же величины на ТЭС, называется *вытесняющей*. Это та мощность, с которой ГЭС участвует в покрытии годового (обычно—декабрьского) пика нагрузок, плюс относимые к ГЭС резервы системы.

В некоторых случаях на ГЭС выгодно иметь установленную мощность $N_у$, бóльшую минимально необходимой для энергосистемы; тогда избыточная мощность ГЭС должна работать при повышенном стоке (экономия топлива на ТЭС), при ремонтах на ГЭС и ТЭС, а также при авариях на ТЭС (и ГЭС), если для этого предусмотрен запас воды. Избыточная часть установленной мощности ГЭС, заменяя при этом такую же величину мощности энергосистемы, выводимую на тот период из работы, называется *дублирующей* мощностью.

Участие ГЭС и ТЭС в покрытии графика суточных нагрузок энергосистемы определяется показанной на рис. 80 *анализирующей* кривой, или интегральной кривой энергии $Э=\varphi(N)$. Эта кривая характеризует изменение площади графика мощностей (выражающей величину энергии $Э$ и измеряемой от базиса или от вершины графика) до любой мощности N в зависимости от величины этой мощности.

Зная количество суточной энергии, получаемой от какой-либо установки, и пользуясь анализирующей кривой, находим мощность, которую примет на себя эта установка в зависимости от того, какую часть графика нагрузки (пиковую, базисную или среднюю) намечается покрывать ее суточной энергией $Э_{сут}$. Для этого на соответствующем участке оси абсцисс откладывается величина $Э_{сут}$ и по кривой $Э=\varphi(N)$ определяется искомая мощность N. На рис. 80 показан расчет мощности ГЭС при покрытии ее энергией пиковой части графика нагрузок.

С изменением водности в разное время года участие станций в покрытии графика нагрузок также изменяется (рис. 81): регулирующая ГЭС работает то в пиковой части графика, то в более полной его части (средней или нижней, базисной) для экономии топлива на ТЭС.

В ряде случаев ГЭС бывает вынуждена часть своей обеспеченной энергии переводить в базисную часть графика и в маловодные сезоны, что вызывается, например, условиями водного транспорта или другими потребителями воды на ниже лежащем участке реки.

При указанных ограничениях в работе ГЭС или при отсутствии их и независимо от того, находится ГЭС в энергосистеме или работает изолированно, она всегда характеризуется следующими водноэнергетическими и технико-экономическими показателями:

1) обеспеченные среднесуточная и пиковая мощности;
2) среднегодовая энерговыработка;
3) установленная мощность;
4) число часов использования установленной мощности в среднем за год;
5) капиталовложения общие и удельные на 1 кВт установленной мощности и на 1 кВт · ч среднегодовой энерговыработки, а также себестоимость 1 кВт · ч;
6) коэффициент регулирования стока;
7) коэффициент использования стока.

Для любого створа реки с конкретными гидрологическими условиями (величинами стока за характерные годы, его внутригодовым распределением и т. п.) вышеуказанные, связанные между собой показатели зависят от нормального подпорного горизонта (НПГ), величины полезной емкости и режима регулирования стока соответственно режиму энергопотребления. Однако условия и режим регулирования зависят от оборудования ГЭС, с которым следует ознакомиться заранее.

Характеристики турбин ГЭС

Водяные турбины разделяются на *активные* и *реактивные*. К первым относятся *ковшовые*, представляющие укрепленный на валу диск с ковшами по его периметру. Турбина действует под напором струи, направляемой соплом на ковши. Применяется для высоконапорных установок ($H > 50$ м) при небольших расходах воды. К реактивным относятся три типа турбин: 1) радиально-осевые (для $H = 30 \div 500$ м), 2) поворотно-лопастные (для $H = 3 \div 80$ м) и 3) пропеллерные (при мало меняющейся нагрузке). Вращение их создается реактивной силой, возникающей на лопатках турбин под давлением воды: встретившиеся поток и лопатка движутся в разных направлениях. Свойства всех типов турбин различны и выявляются при помощи коэффициента быстроходности и так называемой универсальной характеристики.

Коэффициентом быстроходности n_s называют величину, равную числу оборотов турбины-модели при напоре $H = 1$ м и мощности $N' = 1$ л. с. (0,736 кВт).

Для турбин данной серии, т. е. при некоторой амплитуде напоров и мощностей, с учетом (по закону кинематического подобия) действительных значений n, H и N кВт

$$n_s = \frac{1{,}17n\sqrt{N}}{H\sqrt[4]{H}}. \qquad (71)$$

Здесь n — число оборотов в минуту, принимаемое обычно в пределах 100—1000, согласно характеристикам генераторов, для которых $n = \frac{60 \cdot 50}{p}$, где 50 — частота периодов тока в секунду, p — число пар полюсов. Постоянство числа оборотов поддерживается регулятором скорости вращения — механизмом, влияющим на степень открытия направляющего аппарата турбины при изменении нагрузки, а значит и частоты тока и скорости вращения агрегата.

Поскольку с увеличением n уменьшаются размеры и вес турбины, генератора и общего вала, то число оборотов n, а значит и тип и серию турбины определяют с использованием формулы (71), вводя в нее по возможности большее значение n_s по приемлемым вариантам оборудования. Но при этом надо помнить, что с увеличением быстроходности машин требуется опускать нижнюю часть здания ГЭС для уменьшения высоты всасывания во избежание явления кавитации (см. ниже).

Наименьшую величину n_s имеют ковшовые турбины ($n_s < 50$), для пропеллерных и поворотно-лопастных $n_s = 500 \div 800$ и более, n_s для радиально-осевых агрегатов имеют промежуточные значения.

Турбины должны удовлетворять колебаниям мощности и напора, происходящим по сезонам и в пределах суток. К колебаниям мощности лучше приспособлены ковшовые и тихоходные радиально-осевые турбины. Первые дают удовлетворительный к. п. д. при падении мощности даже до 10% полной. Радиально-осевые турбины при $n_s = 450$ допускают снижение мощности до 40%. Пропеллерные турбины при $n_s = 800$ перестают удовлетворительно работать уже при мощности примерно 60% полной; при падении Q до 25—45% величины, соответствующей полному открытию направляющего аппарата, эти турбины могут вращаться лишь вхолостую, растрачивая энергию на громадные потери при указанном режиме. В поворотно-лопастных агрегатах (таких же пропеллерных, но с изменяющимся наклоном лопаток) этот недостаток устраняется путем поворота лопаток колеса при колебаниях мощности в широком диапазоне.

К колебаниям напора H лучше приспособлены пропеллерные и быстроходные радиально-осевые турбины. Первые ($n_s = 800$) допускают падение H до 40% оптимальной величины. Для вторых ($n_s = 450$) снижение H допустимо до 60%; для тихоходных предел ограничения еще выше.

Поворотно-лопастные турбины, хорошо приспосабливающиеся

к колебаниям мощности и напора, широко применяются при строительстве мощных низко- и средненапорных ГЭС.

Для выявления свойства рабочих колес реагировать на колебания напора и мощности служат *характеристики* турбин, представляющие графические связи между N, H, Q, n и η, построенные по результатам испытаний модели турбин данной серии (с учетом соотношений подобия).

Основное значение имеют графики связи H, N, η и H, Q, η, показанные на рис. 82 для поворотно-лопастной турбины. Здесь приведены данные для характерных напоров: максимально возмож-

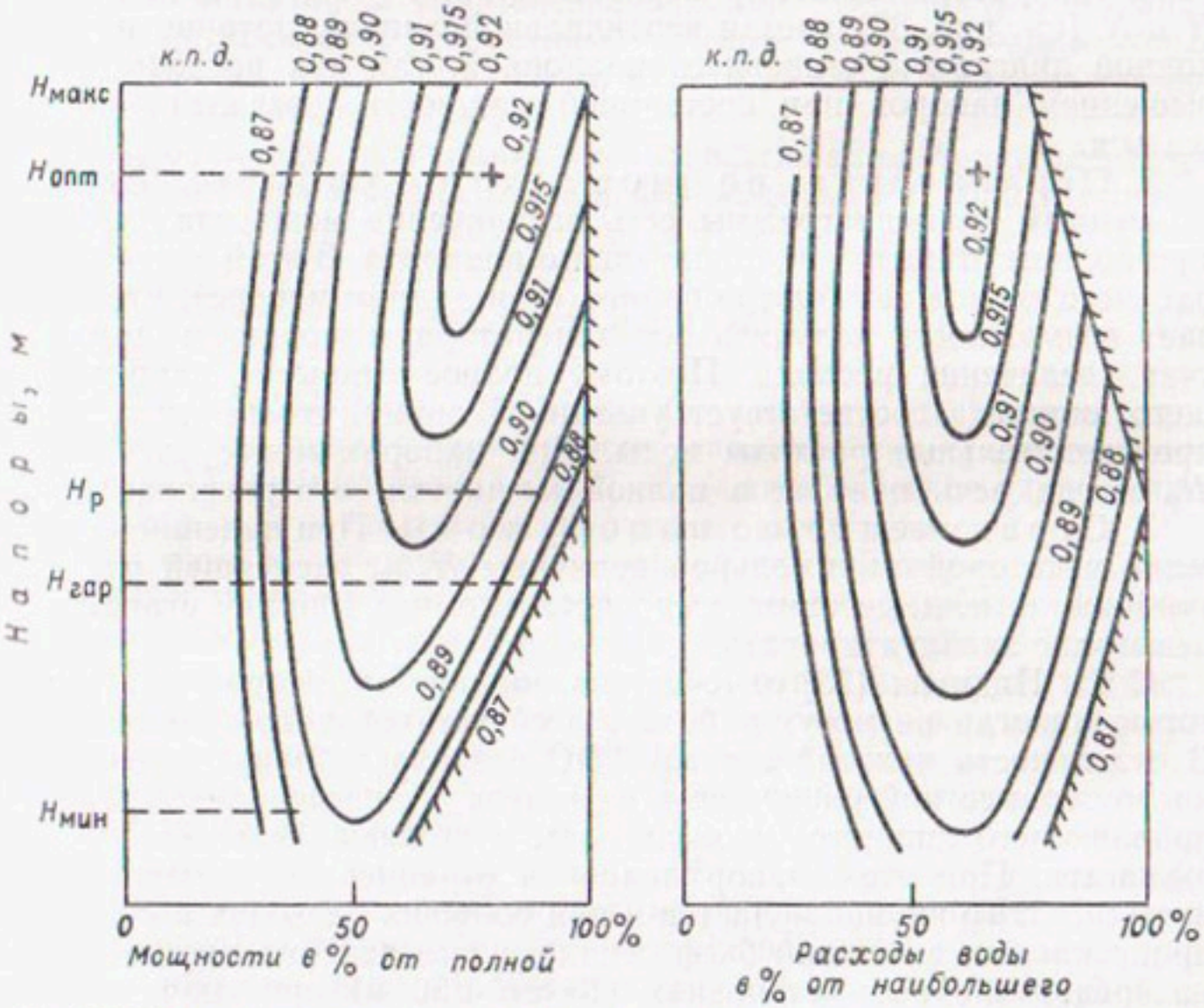


Рис. 82. Напорно-мощностные и напорно-расходные характеристики поворотно-лопастной турбины.

ного $H_{макс}$, оптимального $H_{опт}$, расчетного $H_р$, гарантийного $H_{гар}$ и минимально допустимого $H_{мин}$. Напоры $H_{опт}$, $H_р$ и $H_{гар}$ имеют следующий смысл. Значение $H_{опт}$ соответствует наибольшему к. п. д. турбины. Наименьший напор $H_р$, при котором используется полная мощность турбины и генератора, называется расчетным, а напор $H_{гар}$, по которому определяется вытесняющая мощность ГЭС, — гарантийным напором. Последний определяется обычно по ходу сработки водохранилища в зимнюю межень расчетного маловодного года.

По упомянутым выше графикам путем пересчета строят эксплуатационные зависимости H, Q, N и т. п., определяя искомые величины по заданным из уравнения $N=9{,}81QH\eta$.

Наряду с изображением эффективности работы агрегата при разных сочетаниях H и Q или H и N характеристики турбины показывают также главные из следующих ограничений ее работы.

1. Ограничения по мощности генератора. Турбина и генератор подбираются для некоторой оптимальной зоны напоров и мощностей. При более высоких напорах (до $H_{макс}$) турбина в состоянии увеличить мощность, но она ограничивается параметрами генератора. Поэтому верхний правый угол характеристики H и N (см. рис. 82) срезан вертикальной линией, которая на расходной диаграмме становится наклонной, так как расходы с повышением напоров при постоянной мощности должны уменьшаться.

2. Ограничения по мощности турбины. Нижний скошенный край диаграммы есть ограничение мощности турбины при полном открытии направляющего аппарата. В этой зоне к. п. д. рабочего колеса так быстро падает (при данном напоре), что исчезает возможность получить всю генераторную мощность даже за счет увеличения расхода. Поэтому полное открытие направляющего аппарата соответствует указанной линии, что исключает непроизводительные расходы воды. При напорах менее расчетного $H_р$ всегда речь идет не о полной мощности, а о располагаемой.

3. Ограничения по напору воды. При падении напора ниже некоторой минимальной величины $H_{мин}$, зависящей от типа турбины, к. п. д. ее снижается настолько, что машину становится невыгодно эксплуатировать.

С. Н. Никитин [73] отмечает низконапорные гидростанции, которые никогда не могут работать всей установленной мощностью. В отдельности каждый агрегат ГЭС развивает полную мощность, но при совместной работе всех агрегатов с полным открытием направляющего аппарата уровень воды в нижнем бьефе весьма повышается. При этом напор падает и ограничивает общую мощность ГЭС. То же наблюдается и при больших расходах половодья, пропускаемых в нижний бьеф. Аналогичные явления происходят и на средненапорных установках ($15<H<50$ м) при значительной сработке верхнего бьефа.

Таким образом, напор зависит от хода уровней верхнего и нижнего бьефов и при известном его лимите ограничивает мощность ГЭС.

Наряду с этим на гидроэлектростанциях бывают, понятно, ограничения мощности и по наличным расходам воды. На установках без регулирования такие случаи наблюдаются при значительном снижении естественного притока; на регулирующих ГЭС это наступает в конце сработки водоема, когда ГЭС ограничивает среднесуточную мощность по диспетчерскому графику или переходит на работу по естественному притоку после исчерпания запасов воды.

4. Ограничения по минимальной нагрузке. Это ограничение вызывается неспособностью агрегата работать при нагрузках, равных слишком малой доле полной мощности.

5. Ограничения по кавитации. При чрезмерной высоте всасывающей (или отсасывающей) трубы в вакуумной зоне турбины появляются паровоздушные пустоты, в которых с повышением давления на выходе из турбины пар быстро конденсируется, пузыри исчезают, что сопровождается резкими мгновенными изменениями давления в отдельных точках, ударами и вибрацией всей машины. Это явление, называемое кавитацией, нарушает нормальную работу агрегата, снижает его к. п. д., вызывает интенсивную коррозию металла и разрушение турбины. Опасность кавитации особенно относится к поворотно-лопастным машинам, для которых высота всасывания снижается до нуля и даже до минус 1 м и более от уровня нижнего бьефа.

Исключающая кавитацию высота всасывания h_s определяется по данным лабораторных опытов над моделями турбин и по формуле

$$h_s \leqslant 10 - \frac{Z}{900} - \sigma H, \qquad (72)$$

где 10 — атмосферное давление (м вод. ст.) на уровне моря; $Z : 900$ — уменьшение атмосферного давления при расположении турбин на Z м выше уровня моря; σH — динамическое разрежение; H — напор, м; σ — опытный коэффициент кавитации.

При всех изложенных ограничениях, удовлетворяя колебанию напоров и мощностей и участвуя в покрытии суточных графиков нагрузки всей своей обеспеченной мощностью, турбина возможно большую часть времени суток в годы и периоды разной водности должна работать с высокими к. п. д. Этими условиями и определяются тип и размеры (серия) турбины, выбираемые на основе описанных характеристик и показателей технико-экономических и водохозяйственных расчетов.

Турбины изготовляются мощностью от нескольких сотен киловатт (несерийные) до нескольких сотен тысяч киловатт. Так, на Красноярской ГЭС на Енисее установлено 12 агрегатов по 500 тыс. кВт в каждом. Проектируются турбины еще большей мощности.

Режим регулирования мощностей ГЭС и ее гидроэнергетические и энергоэкономические показатели

Выявление необходимого режима работы ГЭС связывается с перспективными величинами мощностей ТЭС и ГЭС энергосистемы и с режимом энергопотребления. На основании энергетических расчетов для заданной перспективы развития (например, на 10 лет вперед) составляются: 1) годовой график среднесуточных нагрузок, 2) годовой график максимальных мощностей,

3) типовые графики суточных (по часам) нагрузок энергосистемы за средние по нагрузке сутки в каждом сезоне.

Иногда при выборе режима работы ГЭС ориентируются на максимальные по энергии сутки в каждом сезоне. Такая ориентировка является неточной, так как регулирование энергии производится для всего сезона.

Максимальное за сезон суточное энергопотребление $Э_{макс.\,сут}$ может быть определено умножением полученной при регулировании среднесуточной величины $Э_{ср.\,сут}$ на отношение $Э_{макс.\,сут} : Э_{ср.\,сут}$ и на коэффициент, учитывающий недельное регулирование (см. § 3 и 9).

Подбор режима гарантийного регулирования стока по месяцам года состоит в отыскании такой общей установленной мощности всех других электростанций системы, а значит и такого гарантийного режима данной ГЭС, при котором водохранилище в критический маловодный период срабатывается полностью, обеспечивая за время сработки и в конце ее пиковую мощность, необходимую для покрытия обязательного максимума нагрузки.

Для принимаемого значения мощности других электростанций назначается режим гарантируемых среднемесячных мощностей ГЭС, которыми она участвует в покрытии нагрузок системы. При этом учитывается плановый ремонт агрегатов, использование ГЭС в качестве аварийного и нагрузочного резерва и т. д. По намеченным среднемесячным мощностям выполняется расчет регулирования стока критического маловодного периода с учетом переменности напора при сработке водохранилища. По результатам расчета проверяется, исчерпана ли сливная призма и могут ли турбины принятых типов и размеров развивать обязательные для них пиковые мощности по месяцам наименьших напоров. Если эти условия не выполняются, расчет повторяется при ином варианте установленной мощности других электростанций системы, т. е. данной ГЭС.

Гидроэнергетические расчеты при наличии водохранилища выполняются, конечно, не по суткам и в большинстве случаев даже не по пятидневкам, а по декадам во время высокого стока и по месяцам в остальное время года. Понятно, что величины среднемесячных или среднедекадных мощностей являются в то же время и среднесуточными мощностями (без учета недельного регулирования).

Ход расчетов по выбору режима регулирования кратко излагается ниже.

Определив сперва ориентировочно годовое количество гидроэнергии в расчетный маловодный год, на годовом графике среднесуточных нагрузок можно распределить ее с учетом возможностей регулирования и с соблюдением наиболее равномерной работы тепловых электростанций (ГРЭС) в течение всего года. На годовом графике энергосистемы наибольшее энергопотребление относится обычно к началу года (январь—февраль) и к концу (ноябрь—декабрь), т. е. в холодный сезон с длительной темной частью суток, когда требуется наибольшая нагрузка для освеще-

ния, отопления и промышленности. В летние месяцы (июнь—август) обычно наблюдается наименьшая потребность в электроэнергии, в связи с чем на этот сезон приходится в основном ежегодный планово-предупредительный ремонт — осмотр тепловых и гидравлических агрегатов (в сельскохозяйственных районах с машинным орошением график годового хода нагрузок может иметь иное очертание).

При неравномерной конфигурации годового графика нагрузок и для соблюдения возможно большей равномерности работы ГРЭС энергией гидростанции целесообразно покрывать верхнюю часть годового графика (рис. 83).

При наличии водохранилища годового регулирования можно так зарегулировать энергию ГЭС, что раздельной линией на го-

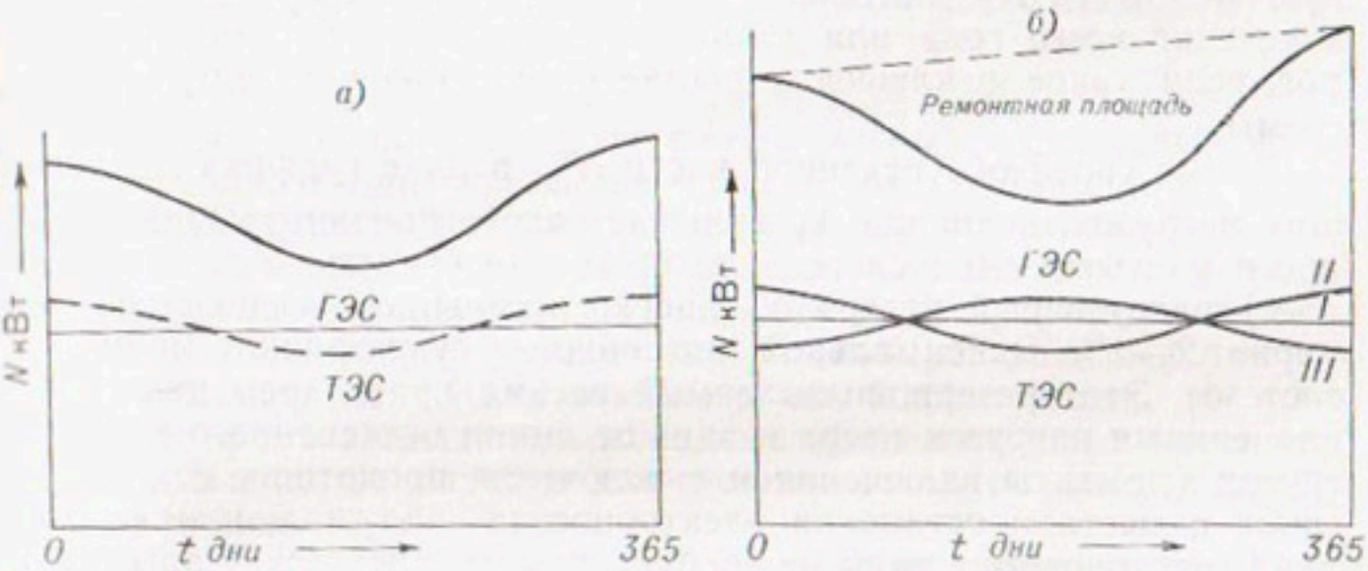


Рис. 83. Годовой график среднесуточных нагрузок (*а*) и максимумов суточных нагрузок (*б*) энергетической системы.

довом графике будет горизонтальная прямая. Однако при этом во избежание дублирующих мощностей при использовании всей энергии маловодного года необходимо соблюдать условие, чтобы предварительная сумма установленных мощностей в энергосистеме вместе с проектируемой ГЭС не превышала наибольших пиков на годовом графике суточных максимумов (с соблюдением необходимых резервов). В результате раздельная линия на рис. 83 может занять выгнутое вниз (но никак не вверх) положение, показанное пунктиром, причем площади графика выше горизонтальной линии и выше пунктира одинаковы.

Предварительно выделенная для ГЭС (и уточняемая путем подбора) часть годового графика нагрузок позволяет наметить соотношения между среднесуточными нагрузками по сезонам, например: зима — 100%, лето — 80%, весна и осень — 90%. По этим соотношениям производится регулирование мощностей ГЭС в течение критического маловодного периода с учетом переменности напора при сработке сливной призмы. Последняя предварительно назначается в пределах $^1/_3$—$^1/_5$ всего напора при НПГ в верхнем бьефе и средних меженных уровнях ниже плотины при работе ГЭС.

Получив величины среднесуточных мощностей ГЭС, проверяют: а) соответствие их годовым графикам среднесуточных и пиковых мощностей (рис. 83); б) полностью ли исчерпана сливная призма; в) могут ли при этом турбины принятых типов и размеров развивать обязательные для них пиковые мощности по месяцам наименьших напоров. Если эти условия не выполняются, расчет повторяется при ином варианте распределения мощностей системы между данной ГЭС и другими электростанциями.

При этом установленная мощность ГЭС предварительно принимается из условия покрытия пиковой части максимальных суточных графиков энергопотребления в каждый сезон. Этим самым определяется обеспеченная часть установленной мощности ГЭС (рис. 80). ГЭС должна быть в состоянии поддерживать установленную мощность $N_у$ длительное время (например, сутки и более) в течение всего года или за исключением периода малых напоров, если такое исключение соответствует падению нагрузок системы.

Кроме своей обеспеченной части $N^{п}_{об}$ в пике графика наибольших нагрузок, величина $N_у$ включает часто дополнительные мощности, учитываемые в системе, которыми могут быть:

а) нагрузочный резерв $N_н$ энергосистемы, составляющий примерно 2—4% максимальной потребной суммарной мощности системы. Этот резерв, вызываемый весьма кратковременными отклонениями нагрузок вверх и вниз от линии постепенного хода нагрузок (моменты включения и выключения прокатного стана, трогания с места и остановки электропоезда — блуждающие пики и т. п.), расходования воды не требует и обеспечивается недогруженными агрегатами, которые мгновенные колебания нагрузки воспринимают при помощи регулятора открытия направляющего аппарата для изменения подачи воды (или пара на ТЭС);

б) аварийный резерв $N_а$, равный 8—10% суммарной мощности энергосистемы (в очень крупных энергосистемах 4—5%) и требующий неприкосновенного запаса воды на период ликвидации аварии (порядка 15 суток). Это обстоятельство часто заставляет создавать аварийный резерв не на ГЭС, а на ТЭС;

в) ремонтный резерв $N_р$ требуется не всегда (см. § 35) и при необходимости устанавливается на ГЭС (или ТЭС). При определении величины ремонтного резерва и сроков ремонта учитывается вся мощность каждой электростанции, в том числе нагрузочный и аварийный резервы;

г) необеспеченная или дублирующая мощность $N_д$.

Дублирующую мощность нельзя отождествлять с аварийным резервом, так как гидростанции без регулирования не имеют запаса воды для обеспеченной работы дублирующей мощности в период ликвидации аварии. На тех установках, где дублирующая мощность располагает необходимым резервом воды для периода ликвидации аварии, эта мощность может учитываться в составе аварийных резервов системы. Если агрегаты ТЭС ремонтируются в половодье, а турбины ГЭС в межень, то дублирующая мощность

учитывается также в составе ремонтного резерва системы, если эта мощность обеспечена водой в первом случае для базисной работы, во втором — для пиковой.

Замена выводимого в ремонт агрегата данной ГЭС другими ее агрегатами не требует дополнительного расхода воды. Поэтому мощность $N_д$ в период низкой межени может быть использована для внутристанционного ремонта. Ремонтный резерв в отдельных случаях создается увеличением мощности генераторов при тех же турбинах, т. е. путем увеличения расчетного напора (см. рис. 82), что обосновывается при выборе $N_у$ данной ГЭС.

Таким образом, в общем случае установленная мощность ГЭС равна

$$N_у = N^{п}_{об} + N_и + N_а + N_р, \text{ или } N_у = N^{п}_{об} + N_ц + N_д,$$

если отнесенная к ГЭС мощность $N_а + N_р < N_д$.

В каждом конкретном случае размер покрытия резервных мощностей дублирующей мощностью ГЭС, а также станция, на которую следует отнести нагрузочный резерв $N_и$, определяются с учетом технико-экономических соображений. Следует иметь в виду, что резервные функции могут в некоторой мере перераспределяться в течение года между установками. Весной резервы выделяются по возможности на ТЭС, а в межень на гидростанциях, если на них в это время появляются свободные мощности, что и имеет место в большинстве случаев для установок на равнинных реках нашей страны.

Мощность $N_у$, полученная в процессе энергетических расчетов, выполняемых параллельно с регулированием стока в маловодном году (периоде), принимается за основу для подбора числа, типа и размеров гидроагрегатов. Их выбором закрепляется окончательная величина $N_у$. Так определяются установленная мощность, обеспеченные среднесуточные мощности ГЭС и требуемый режим регулирования их по сезонам или, более подробно, по месяцам (для конечных стадий проектирования).

При сезонном регулировании эти расчеты выполняются в году со стоком расчетной межени, а при многолетнем — гарантийный режим распространяется на все месяцы года.

При сравнительно невысоких степенях регулирования стока гарантийный режим охватывает не весь год, а лишь часть его, в течение которой происходит сработка сливной призмы. В остальное время, даже в маловодные годы, ГЭС использует избытки воды.

После подбора гарантийного режима строится диспетчерский график (§ 35), на котором отражаются выбранные правила гарантийного режима, сокращения отдачи и расходования избытков воды для возможно большей выработки энергии.

На основании этих данных выполняются гидроэнергетические расчеты за многолетний период, соблюдая обеспеченные мощности при НПГ и за счет сработки принятой сливной призмы. После исчерпания этой призмы, т. е. при достижении ГМО, гидростанция

выдает мощности, работая на бытовом стоке, и не выдерживает обеспеченных мощностей лишь в случае недостатка воды при низком напоре. В многоводные сезоны, во избежание бесполезных сбросов воды через водослив или для снижения их, ГЭС использует всю мощность, вплоть до установленной.

На низконапорных ГЭС снижение мощности против установленной или даже полная остановка станции на 1—2 недели и более возможны в связи с падением напоров при пропуске высоких вод.

В конце зимы, перед половодьем, производится сработка сливной призмы с тем, чтобы получить дополнительную энергию за счет уменьшения сбросов воды в приближающееся половодье. При этом для уменьшения потерь выработки (в связи со снижением горизонта верхнего бьефа и падением напора) предполоводная сработка сливной призмы приурочивается к возможно более позднему сроку. Более подробно режим предполоводной сработки водохранилища изложен в § 34.

По результатам водноэнергетических расчетов строятся хронологические графики и кривые продолжительности элементов режима; подсчитывается энерговыработка ГЭС по годам, средняя годовая выработка за многолетие (за n лет) $\Э_{ср}=\sum_{1}^{n}\Э_i/n$ кВт · ч/год и среднее число часов использования установленной мощности за год $T=\Э_{ср}/N_у$ ч/год. Величина T показывает, сколько часов ГЭС должна работать всей мощностью $N_у$, чтобы дать среднегодовую выработку $\Э_{ср}$. Для ГЭС, работающих на пиках суточного графика, $T=2000\div4000$ ч; для установок, предназначенных в основном для базисной части графика, $T=6000\div6500$ ч. Наряду с этим определяется также выработка энергии и число часов использования установленной мощности в расчетном маловодном году.

Понятно, что режим регулирования, размер сливной призмы водохранилища и величины обеспеченных мощностей (среднесуточных) по сезонам, а следовательно, и установленной мощности, как и средняя годовая выработка энергии, определяются при схематическом проектировании приближенно, а в проектном задании обосновываются соответствующими расчетами.

Экономическая эффективность ГЭС характеризуется удельными капиталовложениями (относящимися к 1 кВт установленной мощности и к 1 кВт · ч среднегодовой энерговыработки), себестоимостью 1 кВт · ч энергии ГЭС, а также сроком окупаемости гидростанции n', который определяется по зависимости

$$n'=\frac{K_г-K_т}{И_т-И_г}\text{ лет},\qquad(73)$$

где $K_г$ и $K_т$ — капиталовложения соответственно в гидравлическую и тепловую станции той же мощности; $И_т$ и $И_г$ — годовые эксплуатационные издержки по тепловой и гидравлической установкам.

Для иллюстрации приведем себестоимость электрической энергии нескольких ГЭС за 1961 г. [145], коп/кВт · ч:

Волховская ГЭС	—0,089	Каховская	—0,218
Днепрогэс им. В. И. Ленина	—0,095	Кременчугская	—0,314
Волжская им. В. И. Ленина	—0,133	Дубоссарская	—0,372
Камская	—0,242	Горьковская	—0,268
Нарвская	—0,144	Усть-Каменогорская	—0,137
Каунасская	—0,227	Бухтарминская	—0,199
Волжская им. XXII съезда КПСС	—0,192	Цимлянская	—0,671
Иркутская	—0,097	Новосибирская	—0,129
Кегумская	—0,247	Средняя по районным ГЭС	—0,200

Себестоимость энергии Красноярской, Саяно-Шушенской и Нурекской ГЭС составляет 0,03—0,04 коп/кВт · ч.

Одновременно дадим примерные аналогичные показатели крупных ГРЭС, потребляющих кузнецкий уголь — 0,4 коп/кВт · ч, подмосковный уголь — 0,8 коп/кВт · ч, донецкий уголь — 0,5—0,6 коп/кВт · ч и торф — 1,0—1,2 коп/кВт · ч.

Примечание. В 1963 г. нормы отчислений на амортизацию по сооружениям и оборудованию ГЭС снижены на 20—25% и составляют около 2%, по старым нормам 2,65%. Для ГРЭС новые нормы отчислений повышены на 10—20%. При этом указанные величины себестоимости энергии несколько изменятся, но порядок и сопоставимость их сохраняются.

И наконец, отметим, что на ГРЭС удельный расход условного топлива (с теплотворной способностью 7000 ккал/кг) по годам составлял

Год	1938	1951	1960	1962
Удельный расход, кг/кВт · ч	0,661	0,581	0,471	0,448

В будущем намечается его снизить до 0,30, чему соответствует к. п. д. ГРЭС, равный 0,41, который и в этом случае очень мал по сравнению с к. п. д. ГЭС, достигающим 0,85—0,87 и более.

Эффективность гидростанции зависит от степени регулирования и использования стока и от правильности выбора оборудования ГЭС.

Коэффициент регулирования стока при энергоиспользовании есть отношение среднего за период сработки водохранилища расхода ГЭС (вместе с потерями на испарение и фильтрацию) к среднему за многолетие расходу (норме) в данном створе. Различают гидростанции без регулирования, с суточным, недельным, сезонным (годовым) и многолетним регулированием стока (мощности). Поскольку для суточного и недельного регулирования требуется небольшой объем воды, то ГЭС, выполняющая сезонное или более высокое регулирование стока, имеет возможность вести также суточное и недельное регулирование мощности.

Коэффициент использования стока гидростанцией есть отношение среднего за многолетие годового объема стока, прошедшего

через турбины ГЭС, ко всему среднему годовому стоку. При этом можно различать коэффициент использования стока гидростанцией и общий коэффициент использования стока (с учетом отъемов воды из верхнего бьефа, расходов на шлюзование и т. п.). Коэффициент использования стока для ГЭС тем больше коэффициента регулирования, чем выше установленная мощность.

Нередко на средних и малых реках регулирование стока выполняется для удовлетворения водопотребителей, расположенных ниже по реке. При такой схеме водоснабжения в створе водохранилищной плотины может быть сооружена гидростанция, работающая на попусковых расходах и имеющая подчиненный режим. Расчет таких подчиненных ГЭС строго увязывается с режимом попусков, которыми и определяются параметры ГЭС и ее оборудования.

В ряде случаев свободная мощность ГЭС соответственно графику нагрузки или из-за недостатка воды используется энергосистемой в качестве синхронного компенсатора для повышения коэффициента мощности ($\cos\varphi$) системы. При этом свободные генераторы ГЭС работают как синхронные электромоторы, но без нагрузки, а турбины вращаются в воздухе (направляющий аппарат закрыт).

На некоторых ГЭС при обосновании экономичности дублирующей мощности специально предусматривается работа дополнительных агрегатов не только в качестве гидрогенераторов при избытке притока, но и как системных компенсаторов при недостатке воды.

§ 32. ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РАБОТЫ ГЭС И ВЫБОР ХАРАКТЕРНЫХ ЛЕТ (ПЕРИОДОВ)

Применительно к гидроэнергетическим расчетам, как и при регулировании стока на заданную водоотдачу, обеспеченность принимается по числу лет (в процентах от многолетия), в которые соблюдаются гарантированные мощности. Однако определение обеспеченности мощностей, в отличие от определения обеспеченности водоотдачи, более затруднительно, так как энергетический режим зависит не только от изменения естественных или регулируемых расходов, но и от хода напоров. Иногда в качестве обеспеченных принимаются мощности для года с таким стоком, при котором энерговыработка имеет заданную обеспеченность в убывающем ряду годовых выработок [по формулам (9) и (10)]. Очевидно, что в этом случае энерговыработка и мощности по обеспеченности отождествляются, что теоретически неправильно и может привести к ошибочным выводам при проектировании режима ГЭС и выборе ее параметров.

Наиболее резко различие в обеспеченностях мощности и энергии выступает по установкам без регулирования или только с суточным регулированием. Неодинаковое внутригодовое распределение стока в отдельные годы приводит к тому, что в разные годы энерговыработка может быть одинаковой, а мощности в те же годы мо-

гут значительно отличаться: в одни из них мощности сравнительно велики и равномерны в течение межени, в другие — энергия вырабатывается в основном, например, весной или осенью, а в остальные сезоны выработка и мощности незначительны. Несколько меньше заметно различие в обеспеченностях мощности и энергии на ГЭС с относительно небольшим водохранилищем для частичного внутригодового регулирования, при котором не исключаются случаи дефицита воды (и энергии) в течение некоторой части сравнительно многоводного в целом года.

По гидростанциям на равнинных реках с водохранилищами годового регулирования, радикально изменяющего распределение стока и энергии, и тем более по многолетне регулирующим установкам обеспеченности годовой выработки и мощности можно считать практически одинаковыми. В этих случаях, по замечанию С. Н. Никитина [73], между мощностью и энергией существует определенное соотношение как следствие вливания энергии в конкретные формы годовых и суточных графиков нагрузок. Однако и в этих случаях высокого регулирования стока совпадение обеспеченностей выработки и мощности возможно лишь при условии:

а) если в маловодные годы, лежащие за пределами расчетной обеспеченности, ГЭС работает по специальной диспетчерской схеме постепенного понижения мощностей в течение года (при работе по нормальному графику до полного исчерпания водохранилища расхождение обеспеченностей сохраняется);

б) если рассматриваются равнинные реки, отличающиеся, как известно, четко выраженными фазами стока весны и межени.

Но по установкам на горных и полугорных реках типа Днестра, Теребли, Куры и других, характерных чередованием летних паводков и резких понижений стока, даже при многолетнем регулировании оказывается, что в году с мощностями заданной обеспеченности [по формулам (9) и (10)] энерговыработка получается несколько большей обеспеченности. Более подробно этот вопрос изложен в 1951 г. [77]. Примерно такие же соотношения должны приниматься и при выборе обеспеченного стока для получения мощностей заданной обеспеченности. Иначе говоря, сток, как и энерговыработка, должен иметь несколько бóльшую обеспеченность, чем заданная обеспеченность мощностей, причем для равнинных рек расхождение в обеспеченностях стока (энергии) и мощности распространяется на невысокое, неполное годовое регулирование, а для горных и полугорных рек это расхождение выражено сильнее и захватывает даже невысокое многолетнее регулирование.

Обеспеченность стока при многолетнем регулировании относится к маловодному периоду лет, при полном годовом — к году в целом и отдельно к его межени, при частичном внутригодовом — к межени маловодного года и в особенности к ее наиболее ответственным по мощностям сезонам.

Уместно заметить, что обеспеченность энергосистемы, имеющей аварийные или ремонтные резервы мощностей на тепловых электростанциях, отличается от

обеспеченности работы отдельной ГЭС системы. Мощность отдельной ГЭС, выпавшая из-за недостатка воды, замещается полностью или частично упомянутой резервной мощностью, причем обеспеченность работы системы становится большей, чем обеспеченность работы отдельной ГЭС.

Таким образом, соблюдение обеспеченности режима ГЭС связано с выбором расчетного года при сезонном и полном годовом регулировании. Несколько маловодных лет с одинаковыми объемами годового стока, удовлетворяющих упомянутому соотношению обеспеченностей стока и мощности, могут давать разный энергетический эффект, что зависит от особенностей внутригодового распределения стока в каждом году. Поэтому необходимо, чтобы и обеспеченность меженного стока при типичном его ходе была достаточно высокой. При частичном же регулировании, не охватывающем всего периода низкого стока, обеспеченность стока межени и ее лимитирующего сезона, как и ход низкого стока, имеют особо важное значение, а поэтому должны учитываться с необходимой осторожностью, так как на ГЭС, расположенных на малых реках, нередко бывают серьезные отклонения от проектных предположений. Указанное обстоятельство учитывается в методе расчета сезонного регулирования стока В. Г. Андреянова [7] на основе обобщения данных по годовым дефицитам стока до различных расходов отдачи.

При многолетнем регулировании обеспеченность стока за двух- или трехлетний период, определяемая соответственно модульному коэффициенту при $C_v^{(n)} = C_v : \sqrt{n}$, также должна быть несколько выше обеспеченности, заданной для мощностей. Это вытекает также из того, что при расчетах по второму методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [61] сток и отдача не тождественны по обеспеченности и что при определении стока по вышеприведенной зависимости для $C_v^{(n)}$ обеспеченность его за n-летие следует принимать большей, чем обеспеченность отдачи (или мощностей). Длительность периода сработки менее важна, чем обеспеченность стока за период. Поэтому выбор расчетного периода из возможных вариантов должен сопровождаться сравнением обеспеченностей стока по этим вариантам (см. § 10).

Определение средней за многолетие годовой энерговыработки при недостатке гидрометрических данных может производиться по характерному среднему году в случаях годового и более низкого регулирования стока. Однако при этом возможны некоторые отклонения от средней за многолетие выработки в связи с особенностями распределения стока по каждому из средневодных лет. Поэтому при наличии любой возможности желательно среднюю энерговыработку определять по некоторому ряду лет.

При наличии очень продолжительных наблюдений за стоком (40—50 лет и более) для сокращения расчетной работы можно назначить ограниченный расчетный ряд. Этот ряд лет может не включать расчетный маловодный год или период (хотя это желательно), но он должен удовлетворять условиям, указанным в § 2.

В случае, если выполняются массовые расчеты к схеме энергетического использования реки, речного бассейна или рек какого-либо района, когда требуется не столько точность результатов, сколько их сопоставимость, можно допустить еще большее сокращение расчетного ряда. Так, например, при составлении схемы энергоиспользования р. Днестра с многочисленными створами и вариантами НПГ в каждом створе автором был использован следующий прием.

Поскольку измерений расходов в средней части реки пока не производилось (для Могилева-Подольского за прошлые годы имеются данные лишь по уровням воды), сток для всех створов верхней половины реки был установлен по гидрометрическим данным водпоста Залещики, а для створов нижней половины — по водпосту Каменка (эти пункты совпадают со створами ГЭС). На обоих участках реки регулирование стока по всем створам и вариантам НПГ выявилось в пределах от частичного внутригодового до полного годового. Кроме того, в верхнем и нижнем течении намечено по одному водохранилищу (с тремя вариантами НПГ в каждом) для многолетнего регулирования. По интегральным кривым стока, построенным для водпостов Залещики и Каменка, удалось легко выбрать сокращенный репрезентативный ряд, синхронный по наблюдениям в этих пунктах. Однако с целью сокращения расчетной работы этот ряд был использован лишь для контрольных расчетов. Для массовых же расчетов среднегодовой за многолетие энерговыработки была найдена 2-летка, сток которой в обоих указанных пунктах соответствовал норме (один год несколько выше среднего, а второй несколько ниже). По этой 2-летке были выполнены водохозяйственные расчеты по всем створам и вариантам НПГ. В качестве обоснования выбора намеченной 2-летки результаты определения выработки энергии по ней были сопоставлены с результатами расчета по указанному ряду для полного годового и минимального регулирования стока (минуя промежуточные варианты) по обоим водпостам. Сравнение показало очень близкое сходство результатов.

Необходимо было убедиться, приемлема ли найденная 2-летка для многолетнего регулирования. С этой целью по одному водохранилищу при НПГ, соответствующем наиболее высокому регулированию стока, была определена среднегодовая энерговыработка по всему имеющемуся гидрометрическому ряду наблюдений, а затем по результатам регулирования найдено среднее начальное наполнение водохранилища (как среднеарифметическая величина из наполнений водохранилища к началу каждого года за многолетие). Принимая среднее начальное наполнение за исходное, была определена энерговыработка за 2-летку, которая хорошо соответствовала многолетней выработке (отличалась от нее на 5%). По остальным пяти вариантам НПГ, соответствующим многолетнему регулированию, определялись лишь средние начальные наполнения по всему многолетнему ряду, что легко выполнялось регулированием при помощи двух упомянутых интегральных кривых. Этим

устранялась необходимость кропотливого построения кривых обеспеченности начальных — конечных наполнений водохранилища при многолетнем регулировании. Энерговыработка определялась по выбранной 2-летке. В результате массовые расчеты среднегодовой выработки были выполнены по 2-летке с использованием более длительных рядов (комбинированный прием).

Следует отметить, что для определения обеспеченных мощностей в рассматриваемом примере была выбрана 3-летка, в которой первый год удовлетворял по обоим участкам реки всем вариантам регулирования — от минимального до полного годового. С дальнейшим повышением регулирования стока вовлекался в расчет второй год, а при наибольшем многолетнем регулировании сработка продолжалась и в течение третьего года. При этом сток за один, два и три года принятого маловодного периода по обоим водпостам соответствовал изложенным выше требованиям, предъявляемым к расчетным маловодным годам и периодам. В результате расчеты по всем вариантам створов с различными диапазонами регулирования стока оказались сравнимыми.

Выбор приема расчетов не может быть заранее предусмотрен. Он зависит от характера гидротехнической схемы, диапазонов регулирования, гидрометрической информации и т. п. Для выбора наименее трудоемкого приема расчетов, достаточно удовлетворительного по точности результатов, необходимо в каждом случае специальное тщательное изучение вопроса с анализом предварительных поисковых расчетов. Однако такое изучение требует значительно меньшей затраты труда, чем расчеты по всем створам и вариантам НПГ по длинному ряду.

На окончательной стадии проектирования при наличии гидрометрических материалов гидроэнергетические показатели ГЭС (с любой степенью регулирования) следует подтвердить кривыми продолжительности характеристик работы ее на основе расчетов по достаточно длительному ряду лет.

§ 33. ВИДЫ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

Суточное (и недельное) регулирование. Колебания уровня воды в нижнем бьефе

За исключением случаев нарастания и спада расходов в течение суток при половодьях и паводках, приток воды в пределах суток обычно остается достаточно равномерным. И если гидростанция не располагает бассейном (водохранилищем) суточного регулирования, то ее энергия используется в базисной, более полной части графика суточной нагрузки. При этом, если в некоторые часы нагрузка меньше мощности ГЭС, постоянной на протяжении суток, часть стока не используется и уходит через водосброс. В другие же часы, когда энергопотребление превышает выработку ГЭС, оно не может быть полностью удовлетворено.

Таким образом, на гидростанциях, не имеющих суточного регулирования стока, неравномерное в течение суток энергопотребление по графику нагрузок, равное или даже несколько меньшее выработки ГЭС, не может быть полностью удовлетворено в связи с тем, что суточные графики нагрузок имеют обычно пикообразную форму. При этом покрывается лишь нижняя часть графика в пределах мощности ГЭС по водотоку.

Иначе обстоит дело при наличии бассейна, позволяющего перераспределять практически равномерный суточный приток соответственно неравномерному по часам энергопотреблению. Правда, при одном и том же расходе выработка ГЭС при суточном регулировании несколько меньше выработки без регулирования. Упомянутое понижение энерговыработки при суточном регулировании происходит как за счет снижения среднего за сутки к. п. д. турбин при переменной нагрузке (при большом числе турбин, допускающем наиболее благоприятный режим работы, этого снижения может и не быть), так и за счет некоторого понижения уровня верхнего и повышения уровня нижнего бьефа в среднем за сутки. Однако снижение энерговыработки при суточном регулировании обычно невелико даже на низконапорных установках (2—3%). С повышением напора это снижение уменьшается.

Энерговыработка ГЭС с суточным регулированием, как отмечено в § 31, вливается в пиковую часть графика нагрузок энергосистемы, этим достигается наибольшее вытеснение тепловых мощностей из системы и исключение их работы в той зоне графика, которая является для них неэкономичной.

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

Емкость бассейна суточного регулирования определяется графически с помощью анализирующей кривой (см. рис. 80) или в табличной форме. График почасовых нагрузок перестраивается в график почасовых расходов.

Расход для каждого часа находится постепенным приближением для заданных по часам мощностей с учетом изменения напора при колебании уровней бьефов. При этом используется известное соотношение

$$Q = \frac{N}{9{,}81 H \eta_т \eta_г},$$

где Q выражено в м³/с, N — в кВт, H — в м.

Неравномерное по часам суток потребление воды сопоставляется с равномерным притоком ее, подсчитываются недостающие (заимствуемые из бассейна) или избыточные (накапливаемые) объемы, и вычисляемые приращения суммируются в нарастающем порядке от часа к часу на протяжении суток. Расчет начинается с момента, когда нагрузка ГЭС, повышаясь после ночного минимума, достигает среднесуточной величины. В этот момент бассейн

заполнен доверху. С указанного момента подсчитывается его опорожнение, которое заканчивается на спаде после вечернего максимума, когда нагрузка вновь достигает среднесуточной величины, а бассейн полностью исчерпывается. Затем в том же порядке подсчитываются наполнения бассейна. Расчет выполняется в табл. 68.

Таблица 68

Расчет сработки и наполнения бассейна суточного регулирования

Время от начала регулирования, ч	Интервал времени t, ч	Расход ГЭС $Q_г$, м³/с	Бытовой расход воды в реке Q, м³/с	Избыточный расход $Q_г - Q$, м³/с	Средний избыточный расход $Q_{ср}$, м³/с	Расходуемый объем за интервал $W = 3{,}6\,t \times Q_{ср}$, тыс. м³	Израсходованный объем с начала регулирования, 10^6 м³
0 (в 7 ч утра)		29	29	0			0
	1				+5,5	+19,8	
1		40	29	+11			+0,02
	1				+21	+75,6	
2		60	29	+31			+0,10
и т. д.							и т. д.

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

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

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

для волны повышения

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

для волны понижения

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

где Q_1, Q_2 — расходы турбин соответственно до и после изменения нагрузки, м³/с; b — средняя ширина участка акватории (в метрах), на протяжении которого сможет распространиться возмущение уровня за время Δt работы ГЭС с измененной нагрузкой (Δt — продолжительность ступени графика нагрузок в секундах); λ — скорость (м/с) распространения возмущений уровня, определяемая по приближенной формуле

$$\lambda = \mu \sqrt{g h_{ср}} - v_{ср}.$$

Здесь g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 м/с²; $h_{ср}$ — средняя глубина (в метрах) участка длиной L м, в пределах которого возникают возмущения за время Δt ($L = \lambda \Delta t$); μ — коэффициент, зависящий от глубины и шероховатости участка возмущений и для обычных на равнинных реках бьефов со сравнительно небольшими подпорами, равный 0,5—0,6; $v_{ср}$ — средняя скорость потока при установившемся режиме, м/с. Знак минус соответствует движению волны в верхнем бьефе против течения (для нижнего бьефа учитывается знак плюс).

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

Колебания $\pm \Delta Z$ по равнинным водохранилищам ГЭС составляют обычно несколько сантиметров и в таких случаях при расчетах не учитываются.

Неустановившееся движение воды в нижнем бьефе при суточном регулировании проявляется более резко. В этом случае при небольшом объеме воды, содержащейся в неподпертом или незначительно подпертом русле, колебания уровня у ГЭС достигают 1—2 м и более и, постепенно затухая вниз по течению, распространяются на расстояние 50—70 км и более [1].

Расчеты колебания уровней верхнего и нижнего бьефов выполняются для основных характерных режимов работы ГЭС и в соответствии с необходимостью выяснения тех или иных специфических условий (судоходство, водозабор из реки и т. п.). Так, для зимних суток (декабрь—январь) расчет может потребоваться в связи с тем, что в этот сезон проходит максимум нагрузки и в то же время река стеснена ледяным покровом. Указанные причины вызывают наибольший подъем уровня воды, который в свою очередь может ограничить по напору располагаемую мощность ГЭС. В теплый сезон года детальный расчет колебаний уровней и расходов по протяжению нижнего бьефа имеет особое значение для судоходных рек.

---

[1] Аналогичные значительные (но более медленные) колебания уровня имеют место при пропуске высоких вод. К методике расчета неустановившегося движения применительно к последнему случаю мы вернемся в § 45.

Итак, расчеты неустановившегося движения воды в нижнем бьефе ГЭС, возникающего в результате суточного регулирования на ГЭС, производятся с целью:

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

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

в) характеристики затопления в условиях неустановившихся колебаний в нижнем бьефе при суточном регулировании.

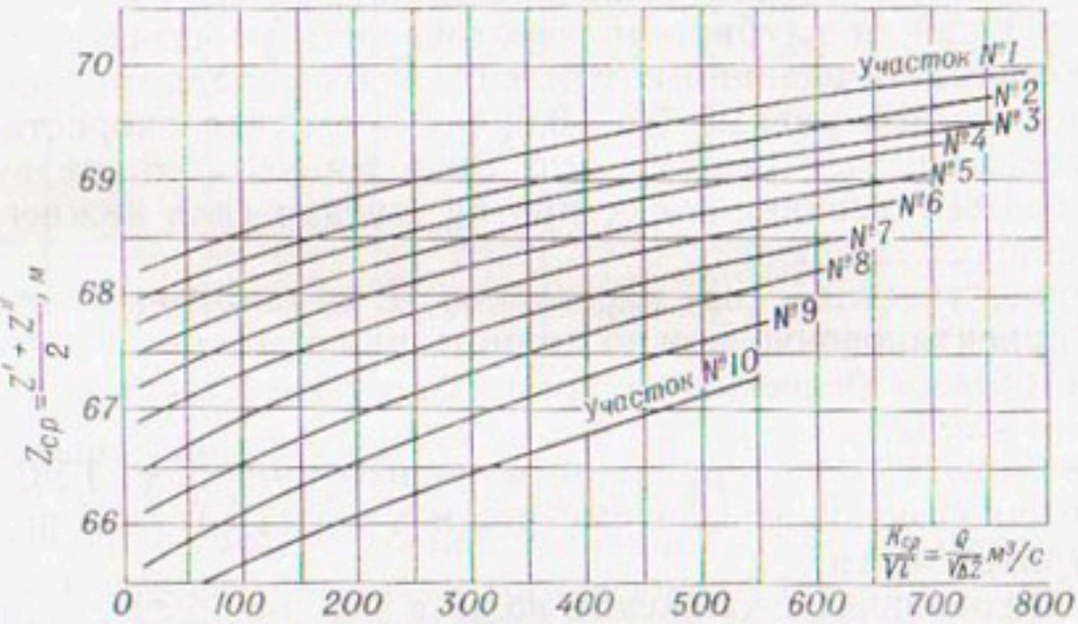


Рис. 84. Кривые гидравлических характеристик для участков нижнего бьефа ГЭС.

Для расчета необходимы следующие исходные данные.

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

2. Гидравлическая характеристика русла. Для учета средней по каждому участку пропускной способности русла $K_{ср}$ общая расчетная протяженность нижнего бьефа делится на участки длиной l, примерно от 2—3 км у плотины до 7—10 км в конце расчетной длины (всего 8—10 участков). Для створов, ограничивающих каждый участок, строятся кривые зависимости расходов от уровней (деление на участки производится с учетом расположения гидрометрических пунктов, из которых упомянутые кривые зависимости по связи уровней переносятся во все раздельные створы, где для этого должны быть организованы водомерные наблюдения). Полученное таким образом семейство кривых (так называемая «ёлочка») позволяет определять для различных расходов соответствующие им концевые отметки уровня Z' и Z'' и величины паде-

Таблица 69

Расчет гидравлических характеристик по формуле (74)

Q м³/с	Z' м	Z'' м	$Z_{ср}$ м	$\Delta Z = Z' - Z''$ м	$\sqrt{\Delta Z}$	$\frac{K_{ср}}{\sqrt{l}} = \frac{Q_{ср}}{\sqrt{\Delta Z}}$
			Участок № 1			
8	66,22	65,98	66,10	0,24	0,49	16,35
40	66,57	66,32	66,45	0,25	0,51	79,1
80	66,92	66,65	66,79	0,27	0,52	154,0

ния ΔZ по каждому участку, что является основой для составления табл. 69 к графическому изображению динамического уравнения потока, или уравнения равновесия, для каждого участка (рис. 84)

$$\frac{K_{ср}}{\sqrt{l}} = \frac{Q_{ср}}{\sqrt{\Delta Z}} = \varphi(Z_{ср}). \qquad (74)$$

3. Топографическая характеристика русла. Для учета изменений русловых объемов определяется емкость каждого участка русла (как произведение полусуммы живых сечений f' и f'' по концам участка на длину последнего). В табл. 70 записываются необходимые для расчетов данные и вычисленные величины площади живого сечения f по створам, деленные (для удобства последующих расчетов, см. табл. 71) на $2\Delta t$ с.

Таблица 70

Расчет кривых $\frac{f}{2\Delta t} = \varphi(Z)$ при $\Delta t = 2$ ч $= 7200$ с

Z м	ΔZ м	B м	$\frac{B_1 + B_2}{2}$	$\Delta f = \frac{B_1 + B_2}{2} \Delta Z$ м²	f м²	$\frac{f}{2\Delta t}$ м²/с
			Створ № 1			
66,25		145			0,0	0,0
	0,50		170,5	85,3		
66,75		196			85,3	0,006
	0,50		211,5	105,8		
67,25		227			191,1	0,013
	0,50		233	116,5		
67,75		239			307,6	0,021
и т. д.						

По данным табл. 70 составляется график (рис. 85).

Для расчета колебания уровня нижнего бьефа чаще всего применяется метод мгновенных режимов Н. М. Бернадского, усовершенствованный В. А. Архангельским [10] и др. Имеется также

Таблица 71

Данные к построению расчетного графика $Q_{ср}=\varphi'(Z', Z'')$ и $Q_{ср}+\frac{v}{\Delta t}=\varphi(Z', Z'')$

Участок № 8, $Z'=60{,}5$ м, $l=10\,000$ м

$Z_{ср}$ м	$\frac{K_{ср}}{\sqrt{l}}$	$\Delta Z=2(Z'-Z_{ср})$ м	$\sqrt{\Delta Z}$	$Q_{ср}=\frac{K_{ср}}{\sqrt{l}}\sqrt{\Delta Z}$ м³/с	$Z''=Z'-\Delta Z=2Z_{ср}-Z'$ м	$\frac{f'}{2\Delta t}$ м²/с	$\frac{f''}{2\Delta t}$ м²/с	$\frac{f_{ср}}{\Delta t}$ м²/с	$\frac{v}{\Delta t}=\frac{f_{ср}}{\Delta t}l$ м³/с	$Q_{ср}+\frac{v}{\Delta t}$ м³/с
60,45	149	0,1	0,32	47,1	60,4	0,019	0,018	0,037	370	417,1
60,40	145	0,2	0,45	65,4	60,3	0,019	0,017	0,036	360	425,4
60,20	127	0,6	0,77	98,0	59,9	0,019	0,016	0,035	350	448,0

более строгий и сложный метод характеристик С. А. Христиановича.

Сущность метода мгновенных режимов сводится к последовательному (во времени и по длине) совместному решению для каждого участка двух уравнений: уравнения равновесия (74) и уравнения неразрывности

$$Q_к^{ср}+\frac{v_к}{\Delta t}=Q_к'+\frac{Q_н'-Q_н''}{2}+\frac{v_н}{\Delta t}+\Delta Q, \qquad (75)$$

где Q — расход на участке, м³/с; v — объем заполнения русла, м³; Δt — расчетный интервал времени по графику нагрузок (обычно $\Delta t=2$ ч $=7200$ с); ΔQ — дополнительная (попутная) приточность на участке (на бесприточных участках $\Delta Q=0$); штрих и два штриха означают, что величины относятся соответственно к верхнему и нижнему концам участка; индексы «к», «н», «ср» обозначают величины, относящиеся соответственно к концу или началу интервала времени, а также среднее из величин на данном участке (как полусумма их для верхнего и нижнего створов).

Вышеуказанные уравнения решаются путем построения для каждого участка русла расчетных графиков (рис. 86), изображающих зависимости:

для уравнения неразрывности

$$Q_к^{ср}+\frac{v_к}{\Delta t}=\varphi(Z', Z''),$$

для уравнения равновесия

$$Q_к^{ср}=\varphi'(Z', Z'').$$

Данные к построению расчетного графика для одного значения Z' приведены в табл. 71 (необходимы расчеты для нескольких значений Z').

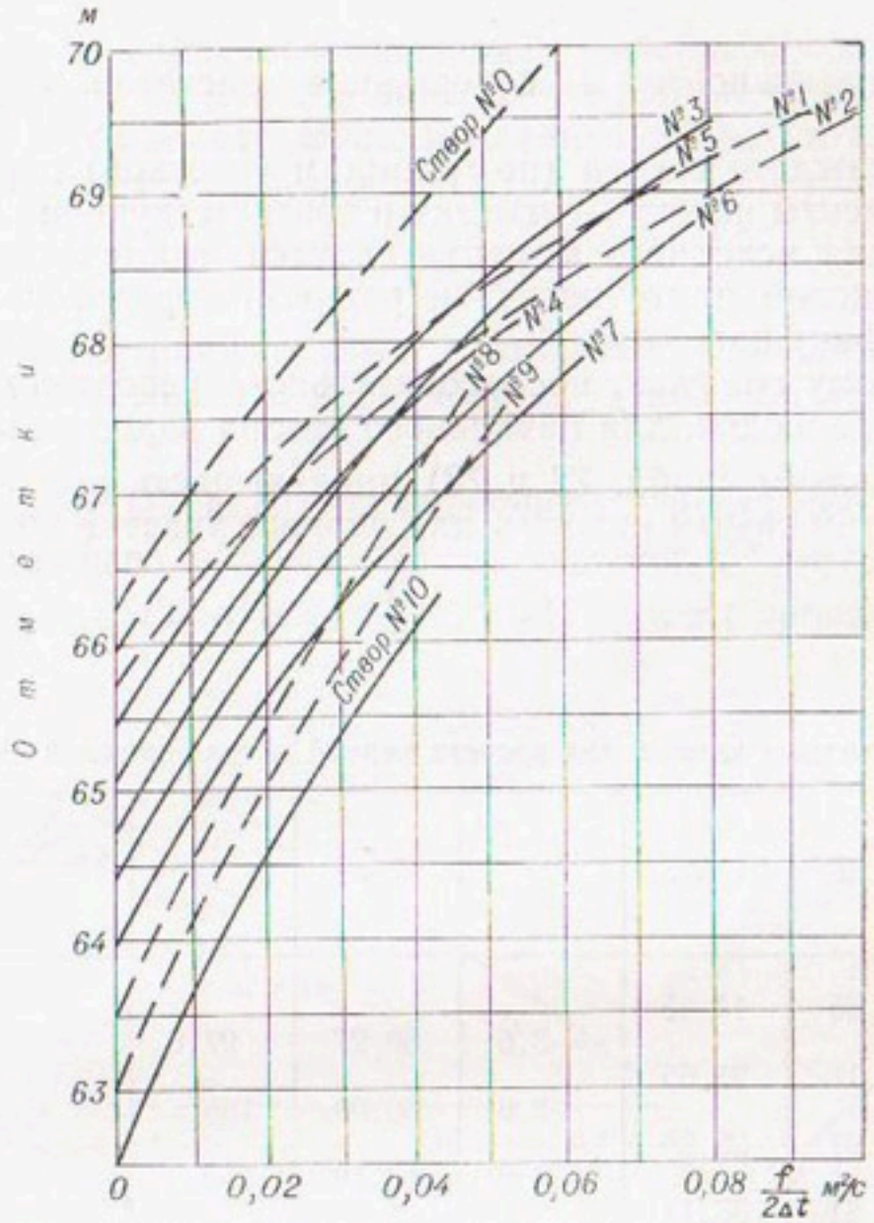


Рис. 85. Кривые морфометрических характеристик для створов нижнего бьефа ГЭС.

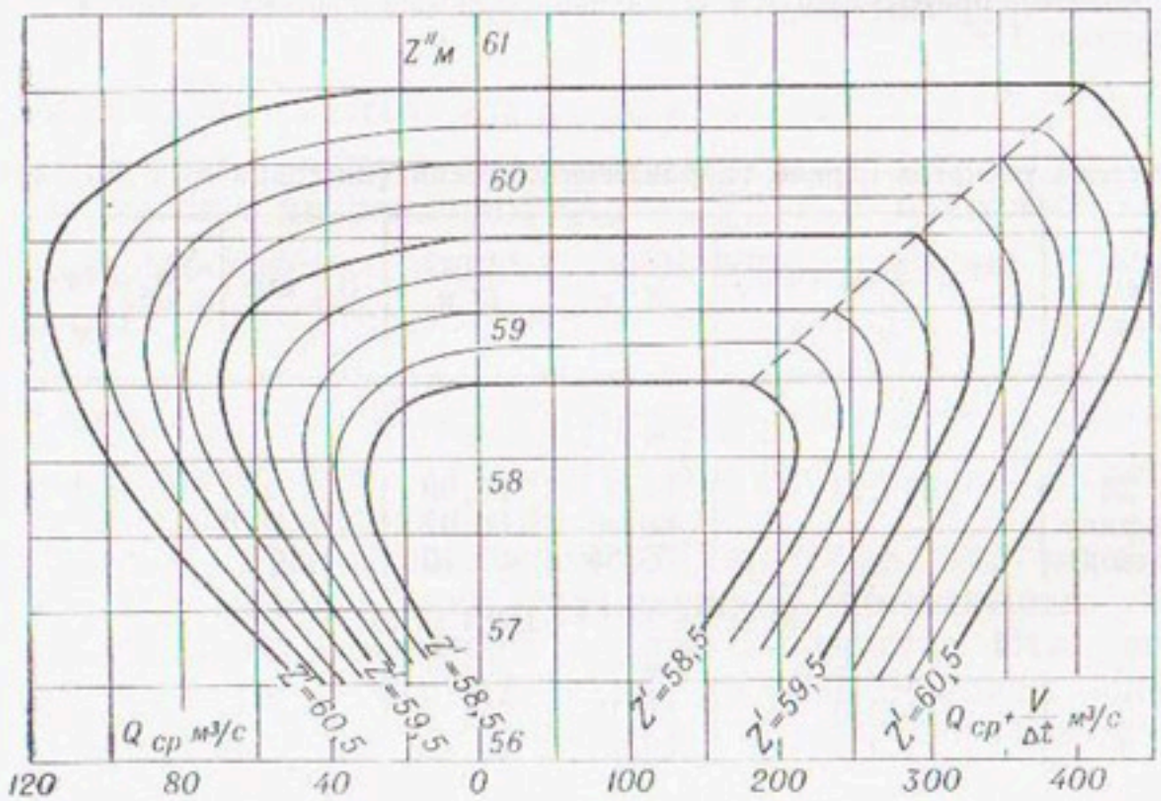


Рис. 86. Расчетный график для участка VIII нижнего бьефа при $\Delta t = 2$ ч.

Последовательность и содержание расчетов состоит в следующем.

1. Для каждого створа (по границам участков) определяем исходные элементы потока — отметки и соответствующие им расходы; последние для исходного момента берутся одинаковыми (при отсутствии боковой приточности) и равными среднесуточному расходу по графику нагрузок.

2. По этому графику, последовательно переводимому в почасовой график расходов, для начального створа находим $Q'_{к}$.

3. Определяем (табл. 72 и 73) правую часть уравнения неразрывности и тем самым находим для первого участка абсциссу:

$$Q_{к}^{ср} + \frac{v_{к}}{\Delta t}.$$

Таблица 72

Исходные данные для расчета первой гидравлической цепи

Створ	Z м	Q м/с	$\frac{Q' - Q''}{2}$ м³/с	$Z_{ср}$ м	$\frac{v}{\Delta t}$ м³/с	$A = \frac{Q' - Q''}{2} + \frac{v}{\Delta t} + \Delta Q$ м³/с
I	66,35	14,45				
			—3,6	66,27	97,6	94
II	66,18	21,65				
			—3,6	66,08	156	152,4
III	65,97	28,86				
			—4,6	65,79	390	391,9
IV	65,61	38,14				

Примечание. Начальные расходы по створам неодинаковы лишь при наличии боковой приточности или в случае, если они зафиксированы в условиях действующей ГЭС.

Таблица 73

Система расчетов первой гидравлической цепи (интервал от 8 до 10 ч)

$Q'_{к}$ м³/с	$Q_{к}^{ср} + \frac{v}{\Delta t} = A + Q'_{к}$ м³/с	Z' м	Z'' м	$Q_{ср}$ м³/с	$Q''_{к} = 2Q_{ср} - Q'_{к}$ м³/с
Участок I (A=94 м³/с)					
25, 24 (по графику нагрузок)	119,24	66,4	66,09	24,0	22,76
		66,45	66,02	26,5	27,76
		66,35	66,23	17.0	8,76
Участок II (A=152,4 м³/с)					
20,7	173,1	66,12	66,07	13,0	5,3
17,9	170,3	66,15	65,91	23,5	29,1
11,8	164,2	66,20	65,78	25,8	39,8

Примечание. Величина A берется из последней графы табл. 72.

4. Пользуясь найденным значением абсциссы, по расчетному графику для того же участка определяем разные возможные значения Z' и Z'' и соответствующие им величины $Q_{ср}$ (т. е. $Q_к^{ср}$).

5. Зная $Q_{ср}$ и $Q'_к$, находим

$$Q''_к = 2Q_{ср} - Q'_к,$$

на основе чего строим кривые возможных совместных решений уравнений неразрывности и равновесия (табл. 73, рис. 87): $Q''_к = \varphi'(Z')$ и $Q''_к = \varphi(Z'')$.

6. Поскольку $Q'_к$ и $Z'_к$ последующего участка совпадают с $Q''_к$ и $Z''_к$ предыдущего участка, то по кривой $Q''_к = \varphi(Z''_к)$ первого участка снимаются значения $Q'_к$ для нескольких произвольных зна-

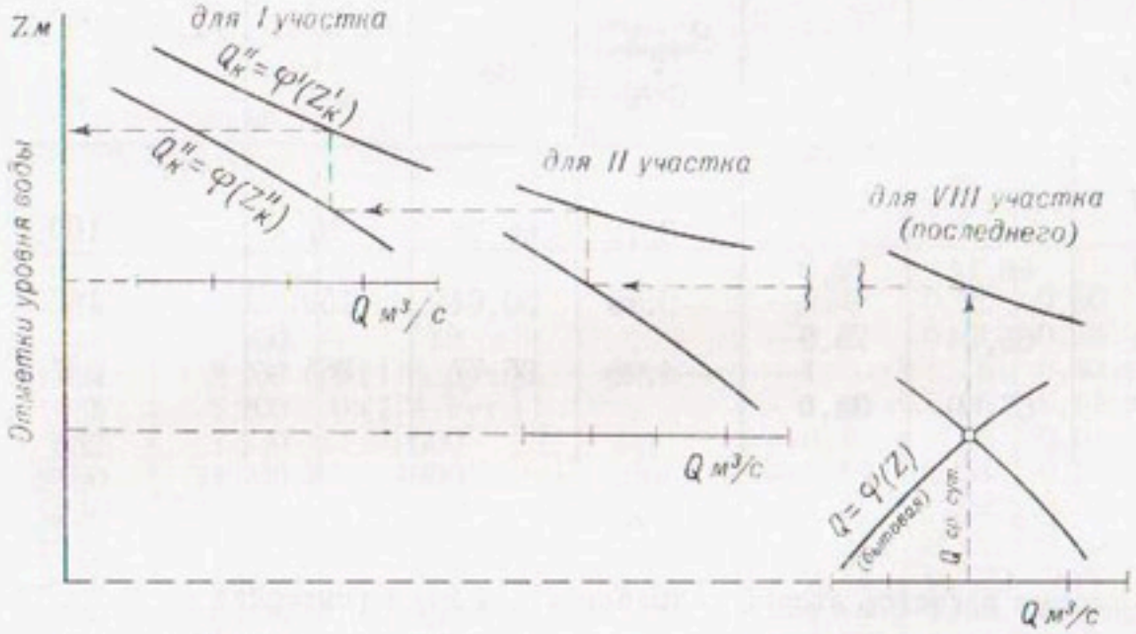


Рис. 87. Построения к расчету одной гидравлической цепи.

чений $Z'_к$ второго участка; для каждой пары $Q'_к$ и $Z'_к$ по расчетному графику второго участка аналогично предыдущему определяются соответствующие им величины $Q_{ср}$ и $Z''_к$, т. е. находятся координаты для построения кривых возможных решений $Q''_к = \varphi(Z''_к)$ и $Q''_к = \varphi'(Z'_к)$ для второго участка, и т. д. до створа, где происходит выклинивание неустановившегося режима, что определяется пересечением кривой $Q''_к = \varphi(Z''_к)$ с кривой расходов для установившегося режима в точке среднесуточного расхода (допустимо расхождение по высоте порядка 10—20 см).

7. По точке пересечения, кроме Z'', на той же вертикали определяется Z', а затем равная ей величина Z'' предыдущего участка с соответствующей отметкой Z' на том же участке. Итак, перемещаясь в обратном порядке до створа плотины, находим однозначное искомое решение по всем участкам в виде конечных для данного интервала Δt отметок и расходов по всем створам.

Таким образом, расчеты для каждого участка оказываются последовательно связанными друг с другом по длине реки.

Все участки от плотины до места выклинивания неустановившегося режима, связанные вышеуказанными расчетами для одного интервала времени ($\Delta t = 2$ ч), составляют так называемую гидравлическую цепь (см. рис. 87).

Конечные результаты расчета, т. е. отметки и расходы по гидравлической цепи для данного интервала времени, являются исходными для соответствующих участков следующей цепи (табл. 74, 75), и, таким образом, расчеты по каждому из участков становятся последовательно связанными также и во времени.

Таблица 74

Исходные данные для расчета второй гидравлической цепи

Створ	Z м	Q м³/с	$\frac{Q' - Q''}{2}$ м³/с	$Z_{ср}$ м	$\frac{v}{\Delta t}$ м³/с	$A = \frac{Q' - Q''}{2} + \frac{v}{\Delta t} + \Delta Q$ м³/с
I	66,38	25,24				
			3,12	66,26	97	100,1
II	66,14	19,0				
			—3,25	66,04	150	146,8
III	65,94	25,5				
			—4,25	65,77	385	387,3
IV	65,60	34,0				

Таблица 75

Система расчетов второй гидравлической цепи (интервал от 10 до 12 ч)

$Q'_к$ м³/с	$Q_к^{ср} + \frac{v}{\Delta t} = A + Q'_к$ м³/с	Z' м	Z'' м	$Q_{ср}$ м³/с	$Q''_к = 2Q_{ср} - Q'_к$ м³/с
Участок I ($A = 100{,}1$ м³/с)					
102,5 (по графику нагрузок)	202,6	66,8	66,14	68,5	34,5
		66,7	66,38	56,0	9,5
		66,9	65,99	74,0	45,5
Участок II ($A = 146{,}8$ м³/с)					
и т. д.					

Примечание. Величина A берется из последней графы табл. 74.

Расчеты продолжаются до тех пор, пока выявится постоянство колебания уровня по всему нижнему бьефу в одноименные часы непрерывно чередующихся суточных режимов регулирования. При $\Delta t = 2$ ч приходится рассчитывать от 16 до 24 гидравлических цепей (до двух полных суток). В результате можно получить наибольшие и наименьшие расходы, уровни и скорости по всем створам.

Характеристика колебаний уровня в нижних бьефах четырех установок, имеющих различные гидравлические условия, приводится в табл. 76 [61]. Как видно из данных этой таблицы, суточное регулирование уменьшает напор на четырех ГЭС от 0,01—0,02 до 0,43—0,50 м. При $H=20$ м снижение напора на 0,2 м уменьшает энерговыработку за сутки на 1%. К этому могут добавиться потери энергии по турбинам, если при суточном регулировании их к. п. д. ухудшится. Но в целом за многолетие уменьшение отдачи, учитывая работу ГЭС с повышенной нагрузкой в периоды обилия воды, меньше потерь по отдельным суточным графикам.

Таблица 76

Результаты суточного регулирования

Название ГЭС	Расход по графику нагрузок, м³/с			Наличие ледяного покрова	Уровень нижнего бьефа, м			Суточная амплитуда колебания уровня, м
	средний	максимальный	минимальный		минимальный	максимальный	средневзвешенный по расходу	
А	78	260	20	нет	—0,48	0,92	0,50	1,40
А	45	160	15	»	—0,27	0,51	0,24	0,78
Б	1284	3 200	0 (1/4 сут.)	есть	—1,20	1,25	0,43	2,45
В	1485	3 200	0 (1/4 сут.)	»	—1,40	0,85	0,13	2,25
В	837	1 500	600	нет	—0,40	0,53	0,02	0,93
Г	5190	11 200	1000	есть	—1,19	1,34	0,34	2,53
Г	5720	12 200	1000	»	—1,13	1,24	0,33	2,37
Г	7270	11 500	1600	»	—1,07	0,81	0,19	1,88
Г	3710	4 800	3000	нет	—0,42	0,22	0,01	0,64
Г	4600	8 000	1300	»	—1,19	1,05	0,26	2,24
Г	4360	8 500	2000	»	—0,70	1,13	0,23	1,83
Г	4360	8 500	3000	»	—0,41	1,03	0,25	1,44

Примечания: 1. Уровень нижнего бьефа, соответствующий среднесуточному расходу ГЭС, принят за нуль. 2. Средневзвешенный уровень соответствует уменьшению средневзвешенного напора по сравнению с напором при среднесуточном расходе (без регулирования).

Амплитуды колебаний уровня вдоль нижнего бьефа шириной 800 м при суточном регулировании ГЭС, по данным В. А. Бахтиарова [12], показаны в табл. 77.

Аналогичная картина отмечается и на рис. 88, изображающем ход уровней во времени и вдоль нижнего бьефа ГЭС с очень выраженной неравномерностью ее расходов по часам суток [61].

При резком повышении расходов уклон в нижнем бьефе, у ГЭС, сперва резко возрастает, затем уполаживается и приближается к установившемуся, а при сбросе нагрузки становится меньше его, в то же время оставаясь большим по другим створам.

Соответственно изменяются и другие характеристики потока во времени и по длине реки.

Таблица 77

Колебания расхода ГЭС и уровня нижнего бьефа

Сезон	Расход по графику нагрузок, м³/с			Амплитуда колебаний уровня (м) на разных расстояниях от ГЭС (км)			
	среднесуточный	максимальный	минимальный	0	10	25	63,8
Лето	1150	1830	750	0,8	0,6	0,3	0,2
Зима	950	1810	250	2,0	1,3	0,8	0,3

Отметим, что получение таких полных результатов расчета неустановившегося движения требует проведения изыскательских работ (составление поперечников по расчетным створам, привязанных к одной системе уровней) и водомерных наблюдений для построения графиков связи уровней при переносе кривых расходов из гидрометрических пунктов в расчетные створы. В случае недостатка гидрометрических данных необходимо измерение расходов воды в двух-трех створах для построения кривых $Q=\varphi(Z)$.

Кроме того, расчет неустановившегося движения является довольно трудоемким. Поэтому такой расчет выполняется для завершающих стадий проектирования и в ответственных случаях. При иных условиях ограничиваются упрощенными расчетами.

Для приближенной оценки максимального уровня, возникающего в результате суточного регулирования непосредственно ниже ГЭС, можно воспользоваться эмпирической формулой

$$Z_{\text{макс}}=Z_{\text{ср}}+\zeta(Z_{\text{пр}}-Z_{\text{ср}}), \qquad (76)$$

где $Z_{\text{макс}}$ — искомая максимальная отметка уровня нижнего бьефа; $Z_{\text{ср}}$ и $Z_{\text{пр}}$ — отметки, которые наблюдались бы при длительной работе ГЭС соответственно со среднесуточным и максимальным (пиковым) расходами (эти отметки определяются по кривой зависимости расходов от уровней нижнего бьефа ГЭС); ζ — коэффициент, зависящий от полноты графика нагрузок, т. е. от отношения среднесуточного расхода к максимальному (пиковому) по графику нагрузок. На основании многочисленных расчетов Гидропроектом и Гидроэнергопроектом построена приближенная зависимость для этого коэффициента $\zeta=\varphi(Q_{\text{ср}}/Q_{\text{макс}})$, представленная на рис. 89 и используемая для различных гидроэнергетических расчетов при суточном регулировании в проектных условиях и при эксплуатации ГЭС. Иногда величину коэффициента ζ принимают равной 0,5.

При оценке напора, с которым работает ГЭС в момент пика нагрузки, из осторожности обычно считают, что наивысший уровень нижнего бьефа совпадает с этим моментом. Фактически наивысший подъем уровня нижнего бьефа несколько запаздывает по

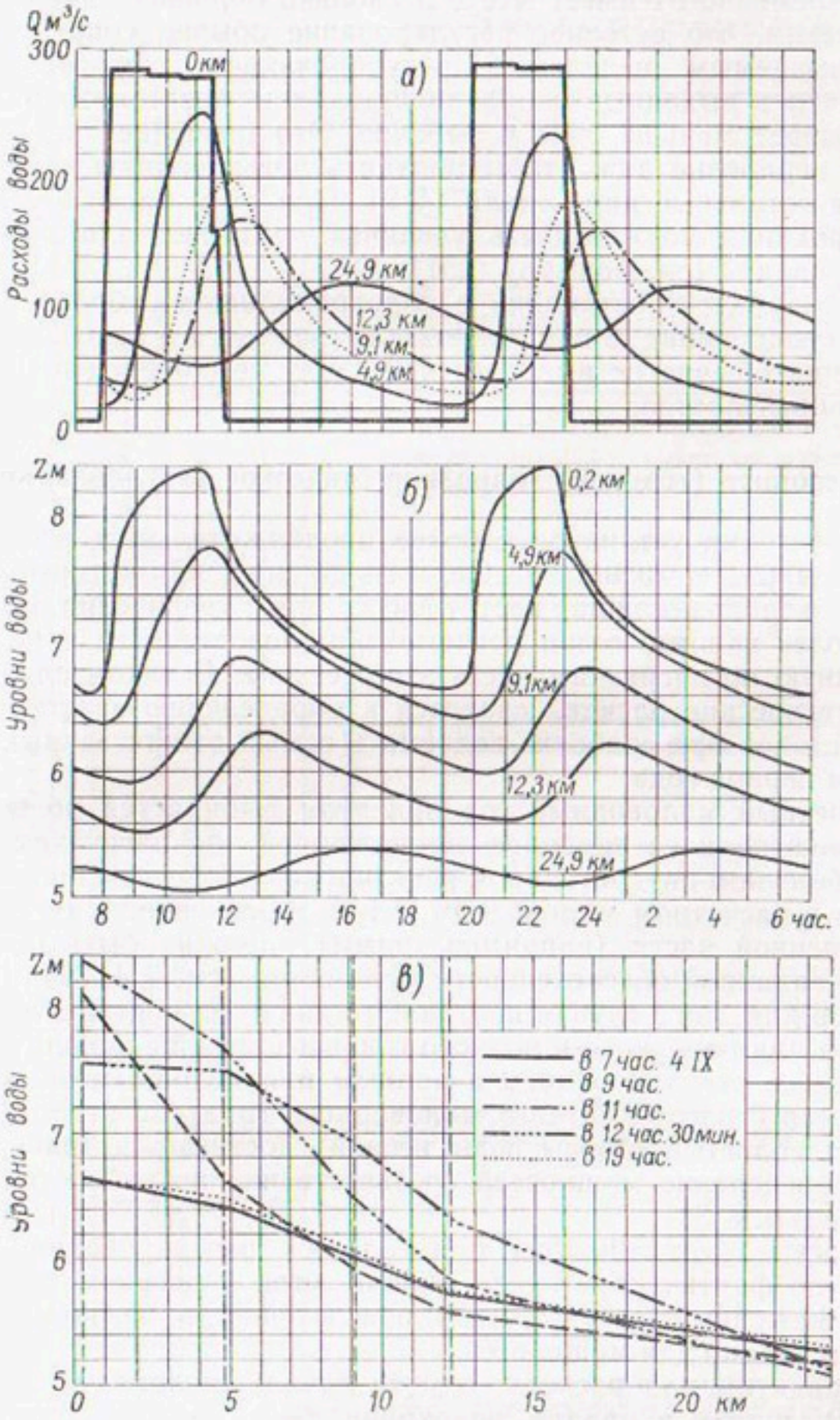


Рис. 88. Колебания расходов (*а*), уровней воды (*б*) и мгновенные профили (*в*) в нижнем бьефе ГЭС при суточном регулировании.

отношению к пику. Поэтому на момент пика нагрузки (особенно кратковременного) имеет место несколько больший напор.

Отметим, что суточное регулирование обычно сопровождается так называемым недельным регулированием, которое связано с тем, что в выходные и праздничные дни энергопотребление от ГЭС бывает меньше, чем в рабочие. Это позволяет накапливать воду в нерабочие дни, чтобы получить повышенную энерговыработку в остальные дни недели (§ 9). При этом бассейн суточного регулирования должен быть увеличен на объем для недельного регулирования [см. формулу (25)].

На гидроэлектростанциях с водохранилищами более длительного регулирования стока емкость для суточного и недельного регулирования обычно не выделяется и ввиду ее сравнительной малости не определяется.

Сезонное (годовое) гидроэнергетическое регулирование

К категории установок с более продолжительным регулированием, чем рассмотренное выше, относятся ГЭС, которые имеют емкость водохранилища, достаточную для увеличения мощности в наиболее важный сезон расчетного маловодного года или в напряженную по нагрузкам часть этого сезона. В таком случае гидроэнергетические расчеты сводятся к определению зарегулированных расходов при сработке водоема в самый ответственный по нагрузкам период года.

Расчетный маловодный год при этом выбирается по величине стока межени и ее наиболее напряженной по нагрузкам части. При небольшом внутригодовом регулировании обеспеченность стока межени в расчетном маловодном году и в особенности ее наиболее ответственной части (например, зимы) должна быть несколько больше заданной обеспеченности мощностей (см. § 4, 32). Техника расчетов для этого случая проста. Это видно из приведенных ниже расчетов для неполного и полного годового регулирования.

Годовым регулированием с полным или неполным использованием всего стока расчетного маловодного года (во втором случае имеются холостые сбросы воды весной) достигается значительное перераспределение мощностей соответственно потребности энергосистемы (см. § 31).

Емкости водохранилища при годовом регулировании определяются по фактическому году, общий сток которого, во всяком случае меженный, соответствует обеспеченности несколько большей, чем задано для мощностей.

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

При отсутствии достаточных гидрометрических материалов емкость годового регулирования с учетом упомянутых замечаний

Ведомость гидроэнергетических расчетов

Месяц	Расход воды, м³/с											
	естественный	потери						попуск из водохранилища	турбины	водослив	нижний бьеф
		испарение	фильтрация	оседание и возврат льда	водоснабжение из водохранилища	шлюзование	сумма				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
					Пустое водохранилище						
III_1	36,8	0,1	0,4	+1,1	0,3	—	+0,3	—	37,1	—	37,5
III_2	96,4	0,1	0,4	+1,0	0,3	—	+0,2	—27,8	64,0	4,8	69,2
III_3	240	0,1	0,4	—	0,3	—	0,8	—52,1	63,7	123,4	187,5
IV_1	213	0,3	0,4	—	0,3	0,4	1,4	—	64,7	146,9	212,4
IV_2	68,9	0,3	0,4	—	0,3	0,4	1,4	—	60,5	7,0	68,3
IV_3	21,1	0,3	0,4	—	0,3	0,4	1,4	—	19,7	—	20,5
V_1	29,0	0,7	0,4	—	0,3	0,4	1,8	—	27,2	—	28,0
V_2	26,9	0,7	0,4	—	0,3	0,4	1,8	—	25,1	—	25,9
V_3	26,9	0,7	0,4	—	0,3	0,4	1,8	—	25,1	—	25,9
VI	23,7	1,0	0,4	—	0,3	0,4	2,1	—	21,8	—	22,6
VII	20,1	1,0	0,4	—	0,3	0,4	2,1	2,5	20,5	—	21,3
VIII	21,3	0,9	0,4	—	0,3	0,4	2,0	1,2	20,5	—	21,3
IX	19,9	0,4	0,4	—	0,3	0,4	1,5	2,0	20,4	—	21,2
X	16,2	0,2	0,4	—	0,3	0,4	1,3	5,8	20,7	—	21,5
XI_1	16,7	0,2	0,4	—	0,3	0,4	1,3	5,8	21,2	—	22,0
XI_2	16,7	0,2	0,4	—	0,3	0,4	1,3	6,4	21,8	—	22,6
XI_3	19,5	0,2	0,4	—	0,3	—	0,9	3,0	21,6	—	22,0
XII	20,9	—0,1	0,4	0,3	0,3	—	0,9	3,2	23,2	—	23,6
I	20,7	—0,1	0,4	0,3	0,3	—	0,9	3,5	23,3	—	23,7
II	21,2	—0,1	0,4	0,1	0,3	—	0,7	3,0	23,5	—	23,9

Месяц	Водохранилище							Уровень нижнего бьефа, м	Средний напор брутто, м	Коэффициент в формуле мощности	Средняя мощность, кВт	Выработка энергии, 10^3 кВт·ч	Пиковые напоры брутто, м	Пиковые мощности, кВт
	объем, 10^6 м³			площадь, км²		уровень, м								
	сработки	конечный	средний	конечная	средняя	конечный	средний							
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
		146,1		21,5		76,0								
III_1	—	146,1	146,1	21,5	21,5	76,0	76,0	54,60	21,40	8,3	6 500	1560	(20,9)	11 000
III_2	—24,0	170,1	148,1	22,6	22,0	77,09	76,54	55,80	20,74	8,0	10 500	2520	20,74	10 500
III_3	—45,0	215,1	192,6	24,5	23,5	79,0	78,04	57,60	20,44	8,0	10 300	2470	20,44	10 300
IV_1	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	57,75	21,25	8,0	10 850	2610	21,25	10 850
IV_2	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	55,77	23,23	8,0	11 000	2640	22,93	11 000
IV_3	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	53,28	25,72	8,0	4 000	962	23,33	11 000
V_1	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	54,0	25,00	8,3	5 570	1335	23,33	11 000
V_2	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	53,84	25,16	8,3	5 170	1240	23,33	11 000
V_3	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	53,84	25,16	8,3	5 170	1240	23,33	11 000
VI	—	215,1	215,1	24,5	24,5	79,0	79,0	53,52	25,48	8,3	4 550	3280	23,33	11 000
VII	6,7	208,4	211,7	24,2	24,3	78,72	78,86	53,39	25,47	8,3	4 270	3180	23,20	11 000
VIII	3,2	205,2	206,8	24,1	24,2	78,58	78,65	53,39	25,26	8,3	4 250	3160	22,97	11 000
IX	5,2	200,0	202,6	23,9	24,0	78,37	78,48	53,38	25,10	8,3	4 200	3020	22,78	11 000
X	15,5	184,5	192,2	23,2	23,5	77,72	78,04	53,41	24,63	8,3	4 170	3100	22,31	11 000
XI_1	5,0	179,5	182	23,0	23,1	77,49	77,60	53,47	24,13	8,3	4 200	1010	21,90	11 000
XI_2	5,5	174,0	176,7	22,8	22,9	77,26	77,36	53,52	23,84	8,3	4 260	1021	21,65	11 000
XI_3	2,6	171,4	172,7	22,6	22,7	77,14	77,20	53,47	23,73	8,3	4 210	1008	21,49	11 000
XII	8,6	162,8	167,1	22,3	22,5	76,75	76,95	54,69	22,26	8,3	4 220	3140	(21,40)	11 000
I	9,4	153,4	158,1	21,8	22,0	76,32	76,54	54,70	21,84	8,3	4 160	3100	(21,30)	11 000
II	7,3	146,1	149,8	21,5	21,6	76,0	76,16	54,73	21,43	8,3	4 120	2770	(20,9)	11 000

Примечание. В зимние месяцы (декабрь—февраль) и в первой декаде марта пиковые мощности выдерживаются при определении уровней нижнего бьефа с учетом суточного регулирования [формула (76) и рис. 89]. Напор нетто равен напору брутто (графы 21 и 25) минус 0,30 м.

относительно обеспеченности стока при энергетическом регулировании определяется по формулам (38) и (46). Техника расчетов и записей показана в табл. 78.

При этом составление водного баланса и определение сработки или наполнения водохранилища производятся одновременно с гидроэнергетическими расчетами для каждого интервала времени (декады, месяца).

Расход воды, пропускаемой через турбины, а значит и объем сработки или наполнения водохранилища определяются путем подбора для получения мощности, заданной или необходимой на этот интервал. Составление водного баланса и расчет отметки сработки или наполнения по каждому интервалу также производятся путем подбора (см. § 10).

Напор брутто определяется как разность уровней верхнего и нижнего бьефов (в нижнем бьефе уровни при расчете средней мощности устанавливаются по кривой зависимости горизонтов от расходов). Потери напора ΔH для подводящего и отводящего каналов учитываются на основании гидравлического расчета, а для решеток — обычно по эмпирическим данным. Общий коэффициент $A = 9{,}81\,\eta_т\eta_г$ в формуле (70) устанавливается по характеристикам турбин и генераторов.

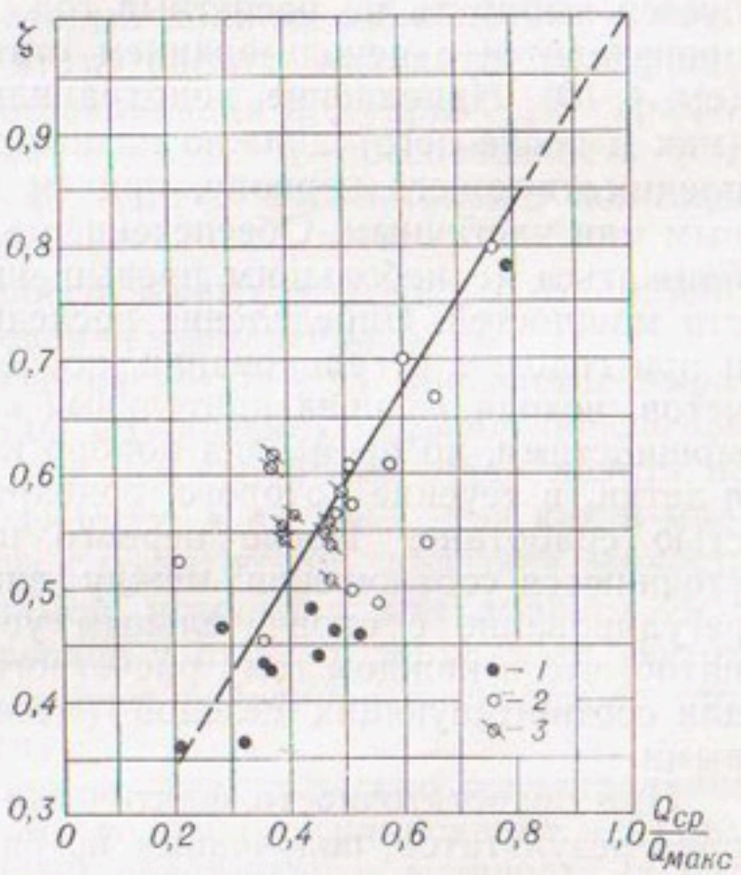


Рис. 89. График для расчета пиковых расходов, напоров и мощностей при суточном регулировании (с учетом неустановившегося движения).

1 — из расчетов по зимним графикам нагрузок, *2* — то же по летним графикам, *3* — данные натурных наблюдений при летних графиках нагрузки.

Пиковые напоры (а значит, и мощности), указанные в табл. 78, определяются для соответствующих пиковых расходов по характеристике турбин $Q = \varphi(H)$ и должны быть равны разности уровней верхнего и нижнего бьефов (за вычетом потерь ΔH). Поскольку уровни нижнего бьефа определяются по кривой зависимости расходов от уровней или при необходимости по формуле (76) и графику на рис. 89, то определение пиковых напоров и соответствующих им расходов производится подбором с учетом ограничений характеристик турбин по мощности генератора, условию кавитации и пропускной способности при НПГ и ГМО [144]. Ограничения для турбин по минимальному напору и нагрузке также должны приниматься во внимание.

Многолетнее гидроэнергетическое регулирование

Многолетнее регулирование стока возникает в случаях, когда расчетный год полностью регулируется водохранилищем по потребностям энергосистемы без использования всей полезной емкости его. При многолетнем регулировании остается емкость, переходящая во время маловодья от одного года к другому, а полная сработка водохранилища происходит в течение 2—3 лет и более. Поэтому для такого вида регулирования стока (и мощности) требуется выбирать не расчетный год, а расчетный период. Выбор производится с использованием статистических параметров стока (см. § 10). Наполнение водохранилища к началу этого периода (как и после него) должно назначаться с учетом водности года, предшествующего периоду, причем наполнение может быть полным или частичным. Обеспеченность стока за период должна приближаться (с небольшим превышением) к заданной обеспеченности мощностей. Определение последних производится так же, как и при годовом регулировании, последовательным уточнением расчетов, исходя из предварительных соотношений между сезонными мощностями, но производя подбор не в одном году, а в расчетном n-летии, в течение которого водохранилище должно быть полностью сработано. После первого подбора сезонных мощностей уточняются соотношения между ними и выполняется повторное регулирование с окончательным установлением мощностей. Понятно, что в каждом году расчетного периода сработки, мощности для соответствующих сезонов (месяцев) должны быть одинаковыми.

При недостаточности фактических данных о стоке и для контроля результатов, полученных по ряду стока, расчет многолетнего регулирования выполняется на основе теории вероятностей. В таком случае соответственно наличной полезной емкости $\beta_{\text{п}}$ при заданных статистических параметрах годового стока (Γ_0, C_v, C_s, m) определяется коэффициент регулирования α и строится кривая обеспеченности наполнений водохранилища к концу года или, что то же, к началу следующего (см. § 13). Эта кривая должна пересекаться с осью абсцисс в точке заданной обеспеченности P. Разделив площадь, ограниченную кривой и осями координат, на величину P (в принятом масштабе), т. е. сделав приводку площади к равновеликому прямоугольнику с основанием P, найдем среднюю к началу года величину наполнения полезной емкости водохранилища за все годы, в которые поддерживается обеспеченная отдача. По этому наполнению с учетом мертвого объема находится начальная отметка зеркала водохранилища. Зная среднюю годовую отдачу $\alpha\Gamma_0$ и среднюю отметку в начале года, можно выполнить расчет мощности и энергии ГЭС по месячным или декадным интервалам, выбрав для этого год со стоком, равным зарегулированной отдаче $\alpha\Gamma_0$, и с типичным для этой величины стока внутригодовым распределением. Начало года привязывается к указанной

отметке. В течение весны происходит наполнение водохранилища до НПГ, и в дальнейшем регулирование стока (мощностей) продолжается в обычном порядке до конца года, когда водохранилище должно быть сработано только до начальной отметки. В итоге мы получим обеспеченные среднесуточные мощности в течение года и обеспеченную энерговыработку.

Расчет можно выполнить также и следующим образом. По величине мощности, назначаемой при подборе, и среднему напору, соответствующему 50—60%-ной полезной емкости, определяется среднегодовой расход воды, который должен соблюдаться в течение критического периода. По этому расходу находится коэффициент регулирования, сезонная составляющая и, например, по графикам на рис. 38 — многолетняя емкость и обеспеченность (см. гл. V). Подбор сделан правильно, если он удовлетворяет полезной емкости и обеспеченности отдачи.

Описание метода расчета обеспеченных мощностей путем подбора при многолетнем регулировании дополнено в § 35.

Для приближенного определения средней за многолетие выработки ГЭС упомянутую площадь, ограниченную кривой обеспеченности начальных наполнений и осями координат, надо делить не на величину расчетной обеспеченности, а на 100%, так как в многолетней перспективе возможны случаи, когда полезная емкость будет исчерпана, наступят перебои, которые также должны быть учтены. Зная начальное наполнение и отметку зеркала (с учетом мертвого объема), выполняем расчет регулирования года со стоком, равным среднемноголетнему.

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

В заключение следует отметить, что в настоящее время наряду с табличными приемами определения параметров ГЭС большое распространение получили и графические приемы гидроэнергетических расчетов [62 и др.].

§ 34. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОДОХРАНИЛИЩА И ГЭС

Последовательность гидроэнергетических расчетов

Проектирование гидроэнергетического использования водотока начинается с составления технико-экономического доклада (ТЭД) или водноэнергетической схемы (ВЭС) использования реки или ее участка. При этом рассматривается ряд вариантов и схем использования реки при нескольких ступенях установок в каждом (см. рис. 1).

Задача составления ТЭД и ВЭС сводится к тому, чтобы на основе всех технико-экономических, в том числе и гидроэнергетических, показателей выбрать наиболее приемлемую схему использования реки и назначить первоочередной объект строительства, который затем переходит на более высокие стадии проектирования.

Вследствие большого количества гидроэнергетических расчетов для составления ТЭД или ВЭС неизбежно приходится их упрощать. Так, например, нижний бьеф при подсчете мощностей принимается постоянным (для средненапорных установок); приближенно определяются или вовсе не учитываются потери воды из водохранилища, если они невелики, не учитывается изменение коэффициентов полезного действия турбин и генераторов при разных режимах, а также влияние на напоры неустановившегося движения воды при суточном регулировании и перемещающейся кромки льда в нижнем бьефе и т. п.

В методическом отношении единообразие и упрощение расчетов при составлении ВЭС использования реки сводятся к следующему.

Нормальный подпорный горизонт каждой ступени назначается постоянным для данного варианта каскада, так как подпоры отдельных ступеней строго связаны схемой использования реки. Таким образом, отметки отдельных ступеней и число последних могут изменяться лишь по вариантам каскадов.

Глубина сработки по каждому водоему, как уже отмечалось, назначается в пределах $^1/_3$—$^1/_5$ напора при НПГ в межень. Для наиболее ответственных ступеней оптимальную глубину сработки (т. е. и полезную емкость $V_п$) следует подтвердить приближенными расчетами. Последовательность сработки водохранилища по всем вариантам ВЭС должна быть по возможности единообразной и обоснованной технико-экономическим расчетом. При этом в качестве притока в водохранилище ГЭС учитываются расходы, зарегулированные верхними ГЭС, и приток с собственного водосбора рассматриваемой установки.

Установленная мощность $N_у$ по каждой ступени при отсутствии для стадии ТЭД достаточно надежных графиков нагрузок определяется приближенно, но по одному и тому же принципу. В качестве такого принципа может быть принято, например, постоянное число часов использования $N_у$ или постоянное соотношение между

$N_у$ и обеспеченной среднесуточной мощностью сезона, наиболее напряженного по нагрузкам.

Допущения и упрощения должны быть единообразными по всем ступеням и всем вариантам каскада, чтобы показатели были сравнимыми при широком охвате гидроэнергетических и энергоэкономических вопросов и упрощенном их освещении.

На основе рассмотрения технико-экономических показателей ряда вариантов выбирается наиболее выгодная схема водноэнергетического использования реки и назначаются из числа наиболее эффективных один или несколько первоочередных объектов строительства, которые освещаются расчетами как при работе вместе с существующими ГЭС, так и после осуществления всего каскада. При этом по отдельным ступеням и вариантам каскадов выбор производится с учетом площадей и объектов затопления, величины капиталовложений, обеспеченных мощностей и среднегодовой энерговыработки, стоимости энергии от ГЭС и ГРЭС, существующих электростанций и энергопотребителей, развития во времени энергосистем и энергопотребления, влияния отдельных ступеней на другие установки и отрасли водного хозяйства, наличия местных строительных материалов, условия производства работ и т. д.

Понятно, что при длительном освоении реки (с большими промежутками времени между пуском одной установки и сооружением следующей), ранее принятая схема энергоиспользования может пересматриваться в связи с изменением экономических, технических и других условий с течением времени.

Следующая стадия проектирования — проектное задание — относится только к первоочередной ГЭС. Круг рассматриваемых вопросов сужается, решаются лишь те задачи, которые относятся в основном к данной установке, но требуется более глубокая их проработка по вариантам НПГ, глубины сработки и установленной мощности.

При этом проектирование ведется в следующем порядке.

1. Для первоочередной ГЭС намечают состав сооружений гидроузла, их типы, размеры и взаимное расположение. Одновременно соответственно утвержденной схеме использования реки назначают возможные предельные отметки НПГ — самую высокую и самую низкую. В этих пределах выбирают три-четыре варианта НПГ.

2. По топографическим и гидрологическим данным определяются возможности регулирования стока для принятых вариантов НПГ и приближенные мощности и энерговыработки ГЭС в средний и предварительно принятый маловодный годы. Учитывая эти показатели и особенности потребителей энергии, устанавливается значение ГЭС в системе и расчетная обеспеченность мощностей энергосистемы для окончательного выбора маловодного года (периода) и для соблюдения гарантированных мощностей ГЭС — среднесуточных и пиковых (по сезонам).

3. Для каждого НПГ назначается, как показано выше, полезная емкость $V_п$ и в соответствии с годовым графиком нагрузки системы намечаются предполагаемые рабочая (вытесняющая) и

установленная мощности ГЭС. Составляется годовой баланс рабочих мощностей системы и несколько ее суточных балансов (по сезонам), по которым строится обеспеченный график среднесуточных мощностей. Годовой (по сезонам) баланс рабочих и среднесуточных мощностей составляется путем подбора с учетом регулирования стока в принятом маловодном году (периоде), т. е. в результате 2—3-кратных поисковых расчетов (см. § 31). Условия регулирования соблюдаются по предварительно намеченному диспетчерскому графику (см. гл. VII и § 35).

4. По вариантам НПГ с учетом принятых для них величин $V_п$ и $N_у$ и диспетчерских графиков производятся гидроэнергетические расчеты по выбранному ряду лет (см. § 2).

5. С учетом состава и размеров сооружений и заданного срока окупаемости капитальных затрат по ГЭС определяются расчетные издержки по дублирующей мощности ГЭС $N_д$, а также издержки по заменяющей энергии ТЭС и находится допустимое расчетное число часов использования $N_д$. При этом выявляется целесообразность создания мощности $N_д$ в энергосистеме и выгодная величина $N_д$ для ГЭС. Вместе с величиной $N_д$ для каждого варианта НПГ определяется размер мощностного резерва на ГЭС и уточняется ее установленная мощность $N_у$.

6. Для каждого варианта НПГ и соответствующего ему значения $N_у$ с использованием диспетчерского графика (при необходимости он после выбора $N_у$ дополняется или исправляется) производится уточнение гидроэнергетических расчетов по гидрологическому ряду. В результате находим среднегодовую за многолетие энерговыработку $Э$ и приращения $\Delta Э$ и $\Delta N_у$ с повышением НПГ.

7. По экономическим характеристикам проектируемой ГЭС определяются приращения удельных расчетных издержек с повышением НПГ на единицу высоты подпора, на единицу дополнительной вытесняющей мощности ГЭС и на единицу вырабатываемой ею дополнительной энергии.

8. По экономическим характеристикам заменяющей ТЭС определяются ее удельные расчетные издержки, соответствующие единице высоты подпора, единице вытесняющей мощности и единице дополнительной энергии ГЭС.

9. По полученным данным определяется срок окупаемости дополнительных капитальных затрат по ГЭС при повышении НПГ и сравнивается с заданным расчетным допустимым сроком окупаемости. Кроме того, сравниваются также удельные расчетные издержки на дополнительный киловатт вытесняющей мощности и на дополнительный киловатт·час энергии ГЭС и заменяющей ТЭС. В результате сравнения выбирается экономически наиболее выгодный вариант НПГ.

10. Для принятых параметров ГЭС, отметки НПГ и установленной мощности выбираются турбины и генераторы, что может потребовать некоторого изменения $N_у$. Затем производятся окончательные подробные гидроэнергетические расчеты для уточнения

энергетических показателей ГЭС и режима ее работы по всей амплитуде напоров и расходов.

В техническом проекте рассматриваются главным образом конструктивные элементы. Однако если в предыдущих проработках не были достаточно освещены некоторые вопросы гидроэнергетических расчетов [например, в связи с незаконченностью топографических изысканий для уточнения кривой объемов $V=f(Z)$ или кратковременностью гидрометрических наблюдений для построения кривой расходов], то детальная проработка этих вопросов переносится иногда даже к началу строительства.

Более подробно выбор НПГ, $V_п$ и $N_у$, а также построение диспетчерских графиков работы ГЭС приводятся ниже.

Выбор НПГ водохранилища гидростанции

Хотя в водноэнергетической схеме использования реки устанавливается отметка НПГ водохранилища, все же в проектном задании этот параметр пересматривается с более подробной проработкой и по уточненным топографическим, гидрометрическим, энергетическим и другим данным. При этом детально учитываются потери и забор воды из водохранилища, колебания уровней верхнего и нижнего бьефов и т. п.

Нормальный подпорный горизонт рассматривается в нескольких вариантах (не менее трех) в увязке с выше лежащим створом и с оценкой влияния всех вариантов НПГ данного водохранилища на гидростанции, существующие и намечаемые для второй очереди строительства.

Как при изолированном рассмотрении вариантов НПГ водохранилища, так и при оценке их влияния на ниже лежащие установки производится анализ изменения обеспеченных мощностей и энерговыработки с изменением НПГ. Если эти показатели изменяются почти пропорционально действующим напорам, то изменение емкости водохранилища для собственной установки и для остальных ГЭС существенного эффекта не дает. Такие условия наблюдаются, когда чаша водохранилища имеет полуканьонный или каньонный характер и изменение емкости (по вариантам НПГ) по сравнению с притоком к водохранилищу невелико. При выборе НПГ глубина сработки, режим регулирования и установленная мощность назначаются как предварительные (см. § 31).

Для момента сработки водохранилища до ГМО следует проверить, какова возможная располагаемая мощность при повышении уровня нижнего бьефа с увеличением расходов через турбины. Если для пика нагрузок полную мощность ГЭС получить невозможно, указанное обстоятельство необходимо учитывать при покрытии графика нагрузок или при назначении глубины сработки водоема и установленной мощности тепловой электростанции. Иначе говоря, необходимо соблюдать как режим среднесуточных мощностей энергосистемы по сезонам (месяцам), так и режим пиковых мощностей (наибольшие мощности ГЭС обычно требуются в декабре—январе,

к концу зимы потребность уменьшается), что следует иметь в виду и при полном водохранилище в случаях повышения уровня нижнего бьефа в периоды половодья и паводков.

В расчетах должны соблюдаться однотипность и единообразие. Особое внимание обращается на приращение величин исследуемых параметров с изменением НПГ. Наглядное представление об этом дает графическое изображение роста среднегодовой энерговыработки и обеспеченной среднесуточной (или установленной) мощности в зависимости от НПГ (рис. 90).

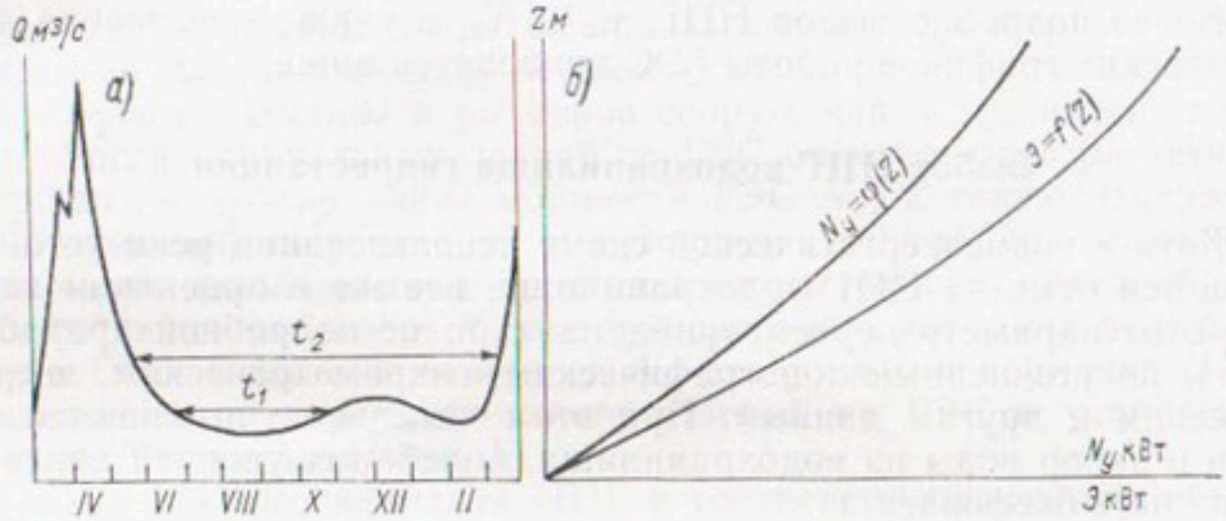


Рис. 90. Зависимость установленной мощности N_y и средней годовой энерговыработки ГЭС $Э$ от отметки НПГ водохранилища Z.

а — схема обеспеченного гидрографа притока, регулируемого водохранилищем; *б* — схема кривых $N_y = \varphi(Z)$ и $Э = f(Z)$.

С повышением НПГ установленная мощность и выработка также растут, но выше некоторой отметки их приращения начинают постепенно затухать (рис. 90 *б*). Это объясняется следующим.

1. Повышение расходов в течение всей межени (влияющих на обеспеченную часть установленной мощности) затухает с повышением регулирования половодья по мере нарастания НПГ (и емкости). Это связано с пикообразной формой волны половодья и с удлинением периода регулирования t (рис. 90 *а*).

2. Неосвоенный сток реки (холостой сброс) с повышением НПГ стремится к нулю.

3. С повышением НПГ среднегодовой напор в долях от напора при НПГ уменьшается в связи со сработкой водохранилища и повышением расходов в нижнем бьефе.

По абсолютным значениям упомянутых показателей находятся их приращения. Имея стоимостные показатели по гидроузлу и другие необходимые данные для разных НПГ, определяем экономическую характеристику ГЭС для каждого НПГ и срок окупаемости дополнительных затрат при повышении НПГ на 1 м по всему интервалу рассматриваемых отметок. Зная нормированный или допускаемый срок окупаемости, находим тот предельный интервал приращений НПГ, для которого срок окупаемости является близким к принятому, причем дальнейшее повышение НПГ вызывает дополнительные капиталовложения, не окупающиеся в течение расчетного срока.

Найденная таким образом предельная отметка НПГ может быть принята за окончательную. Однако во многих случаях при этом учитывается также ряд других специфических условий, стоимостная оценка которых не всегда бывает возможна.

Выбор глубины сработки водохранилища и режим регулирования стока

Установив окончательную отметку НПГ, следует определить для нее более детально оптимально допустимую глубину сработки водохранилища в увязке с требуемым от ГЭС регулированием мощностей. Мощность гидростанции, имеющей водохранилище, образуется за счет приточных расходов, проходящих транзитом через водохранилище и турбины ГЭС, и за счет дополнительных расходов от сработки водоема (в периоды сработки).

Равные дополнительные расходы на различных отметках вызывают разные снижения напора, что зависит от конфигурации чаши водоема.

Увеличивая глубину сработки, мы повышаем зарегулированный расход, но при этом уменьшается напор. Так как объемы водохранилища в слоях высотой 1 м уменьшаются с понижением уровня на каждый следующий метр, то приращение зарегулированного расхода по мере последовательного увеличения глубины сработки постепенно затухает и становится настолько малым, что не может компенсировать падения напора. Транзитные же расходы уменьшают энергетический эффект с самого начала снижения напора. Поэтому обеспеченная мощность ГЭС и выработка энергии с некоторой отметки начинают падать. Задача состоит в том, чтобы найти глубину сработки, при которой обеспеченная мощность была бы наибольшей для заданного режима сработки (при этом и среднегодовая выработка за многолетие обычно оказывается близкой к наибольшей).

Общие соображения о сработке при прочих равных условиях сводятся к следующему [61]:

1) относительная глубина наивыгоднейшей сработки увеличивается с повышением общего напора (при НПГ);

2) чем больше площадь зеркала, а значит и полезная емкость водохранилища, тем выгоднее увеличение сработки;

3) чем больше транзитный сток реки (т. е. чем больше расход воды, поступающей в водохранилище, и чем длительнее период сработки), тем менее выгодна сработка, так как потеря энергии транзитного стока из-за снижения напора превышает выгоду от пропуска через турбины дополнительного объема воды. В многоводную межень сработка должна быть меньше, чем в маловодную. (Практически же сработка оказывается различной в разные годы лишь по продолжительности, абсолютная же ее величина обычно принимается для всех лет постоянной.)

Режим регулирования также оказывает влияние на величину предельной сработки водоема. Так, например, раннее начало

сработки позволяет в начальный период увеличить мощность ГЭС, но так как при этом транзитный сток продолжительно используется при низких напорах, мощность к концу сработки, как и общая выработка ГЭС, будет меньше, чем при кратковременной интенсивной сработке перед наступлением половодья. В последнем случае общая выработка ГЭС повышается, причем и глубина сработки может быть допущена большей, так как объем транзитного стока за небольшое время невелик. Такой режим работы ГЭС допускается лишь в зависимости от конкретных возможностей энергосистемы и энергопотребления, поскольку мощность ГЭС до начала интенсивной сработки бывает при этом небольшой.

Для больших водохранилищ (годовое регулирование) глубина сработки должна определяться также с учетом возможностей обязательного заполнения водохранилища весной маловодного года.

Внутригодовой режим регулирования, как показано в § 31, определяется годовым графиком среднесуточных нагрузок (по месяцам), но в ряде случаев для предельной глубины сработки имеет значение также годовой ход пиковых мощностей и вид суточных графиков (последние для оценки возможных наполнений и опорожнений нижнего бьефа при суточном регулировании). Это следует иметь в виду особенно для низконапорных ГЭС, у которых подъем уровня нижнего бьефа при пике нагрузки может привести к существенному снижению напора в дополнение к сработке верхнего бьефа, в результате чего уменьшится располагаемая по напору мощность ГЭС.

Уместно напомнить, что на низконапорных гидростанциях ограничение или выигрыш мощности бывает то за счет напора, то за счет расхода, в зависимости от соотношения наполнения нижнего и верхнего бьефа. Объяснения этого явления, а также выводы для максимальной мощности $N=f(Q, H)$ опубликованы в 1951 г. [77].

Таким образом, предельная глубина сработки не может рассматриваться изолированно от объема стока за период сработки и от режима ее.

Сработка для регулирования мощностей бывает необходима в маловодные годы, когда ГЭС должна соблюдать обеспеченные мощности. С другой стороны, именно эти годы имеют в сезон сработки небольшой транзитный сток, а потому потери энерговыработки при сработке будут сравнительно невелики. Поэтому предельная глубина сработки определяется для расчетного маловодного года и вызывается лишь необходимостью регулирования мощностей при некоторой потере энерговыработки (по сравнению с иным режимом).

В связи с изложенным предельная сработка водохранилища для соблюдения обеспеченных среднесуточных мощностей обычно имеет место лишь в расчетном маловодном году. Во все остальные годы водохранилище бóльшую часть времени работает при НПГ, при этом через турбины пропускается весь транзитный сток и допускается частичная сработка лишь в той мере, какая бывает необ-

ходима, когда это требуется для поддержания обеспеченных среднесуточных мощностей. Кроме того, накануне половодья водохранилище интенсивно срабатывается гидростанцией для использования весеннего стока, причем сработка по возможности производится обычно до той же предельной отметки. Но увеличение среднесуточной мощности и расхода ГЭС в конце интенсивной сработки не должно приводить к потере располагаемой мощности, требуемой суточным графиком нагрузок. Это условие в некоторых случаях низконапорных ГЭС может быть причиной уменьшения глубины сработки.

Определяя предельную глубину сработки $h_{ср}$ по расчетному маловодному году, задаемся несколькими ее значениями, а тем самым и несколькими вариантами полезной емкости $V_п$, для каждого из которых, регулируя мощности ГЭС по годовому графику

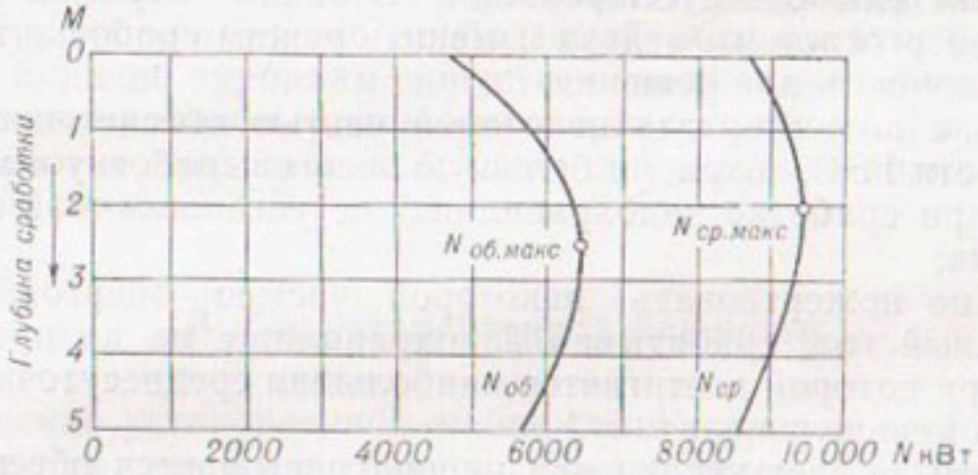


Рис. 91. Зависимости обеспеченной среднесуточной и средней многолетней мощности ГЭС от глубины сработки водохранилища.

нагрузок энергосистемы (см. § 31), находим количество энергии, вырабатываемой ГЭС за период сработки в маловодном году, и величину обеспеченной среднесуточной и пиковой мощности.

Понятно, что в случаях многолетнего регулирования вместо расчетного маловодного года, используемого для годового регулирования, надо брать расчетный маловодный период.

Для каждого варианта сработки подсчитывается также средняя за многолетие годовая выработка (мощность). Результаты расчета можно изобразить в виде кривой зависимости обеспеченной среднесуточной мощности для лимитирующего сезона внутри периода сработки от отметки предельной сработки (рис. 91). На этом же рисунке изображается аналогичная кривая для средней годовой выработки. Максимумы выработки и обеспеченной мощности не совпадают по глубине сработки. Та отметка предельной сработки, при которой обеспеченная мощность достигает максимума, является наивыгоднейшей для регулирования мощностей в маловодном году.

Поскольку режим регулирования соответствует годовому графику среднесуточных мощностей, то для ГЭС со средними и малыми напорами, как упомянуто выше, необходимо для ряда суток

за период сработки проконтролировать соответствие располагаемых по напору мощностей суточным пикам нагрузки. В ряде случаев такой контроль оказывается достаточным даже при приближенном учете напоров (с определением уровня нижнего бьефа по кривой расходов), если при этом пиковые мощности выдерживаются. Иногда же требуется определить уровень нижнего бьефа с учетом неустановившегося движения при суточном регулировании.

Следует отметить, что в некоторых примерах низконапорных установок предельная граница сработки водохранилища, определяемая вышеуказанными расчетами по обеспеченным среднесуточным мощностям маловодного года, размещается так низко, что располагаемая по напору мощность оказывается меньше установленной или той, которая необходима для покрытия суточного пика нагрузки системы без дублирования. В таких случаях, если по условиям энергосистемы нельзя изменить режим сработки водохранилища, возможны два решения:

1) можно пожертвовать некоторой частью обеспеченной пиковой мощности ГЭС, сохраняя большую энерговыработку в маловодном году при сработке водохранилища до установленной предельной отметки;

2) можно пожертвовать некоторой частью энерговыработки в маловодный год, срабатывая водохранилище не до предельной отметки, при которой достигается наибольшая среднесуточная мощность, а на меньшую величину.[1]

При этом за счет увеличения напора повышается обеспеченная пиковая мощность ГЭС, вытесняющая соответствующую часть мощности тепловых электростанций системы.

То или другое из этих двух решений принимается в результате технико-экономического обоснования.

При расчетах $h_{ср}$ установленная мощность должна быть назначена соответственно каждому варианту полезной емкости $V_п$ (см. § 31). Это необходимо:

а) для проверки располагаемой по напору мощности при сработанном водохранилище (в этом случае нас интересует только обеспеченная пиковая мощность ГЭС, вытесняющая мощности других электростанций в расчетном маловодном году);

б) для проверки эффективности вытеснения тепловой энергии, специально назначаемой дублирующей частью мощности ГЭС в многоводные годы и сезоны, когда при больших расходах воды в реке ГЭС круглосуточно может работать с полной установлен-

---

[1] Напомним, что в данном случае наибольшая энерговыработка понимается лишь применительно к заданному режиму регулирования мощностей, а значит и сработки водохранилища в маловодном году. Но нельзя энерговыработку, соответствующую оптимальной сработке, считать наибольшей независимо от режима регулирования, так как в том же маловодном году еще большей была бы отдача ГЭС при отсутствии сработки в течение всей межени и при интенсивном опорожнении водохранилища перед самым началом половодья. Но такой режим сработки в маловодном году неприемлем по балансу мощностей.

ной мощностью (такие возможности оказываются эффективными для ГЭС с относительно небольшими водохранилищами на реках с частыми паводками, как, например, Днестр, Кура и др.).

В заключение отметим, что сработка не всегда бывает энергетически целесообразной. Это, в частности, относится к нижним ступеням каскада при большом транзитном стоке, зарегулированном верховыми водохранилищами, и к установкам с небольшой собственной емкостью (например, Днепрогэс им. В. И. Ленина). Поэтому при выборе $h_{ср}$ и $V_п$ следует учитывать перспективы строительства верховых водохранилищ, после сооружения которых может оказаться целесообразным уменьшение $h_{ср}$ и $V_п$ проектируемой ГЭС. При этом обращается внимание также на возможное заиление, ледовый режим и т. п.

Решающим же при выборе $h_{ср}$ и $V_п$, как видно из приведенного, является сравнение $h_{ср}$ для получения $N_{об.\,макс}$ и $h_{ср}$ по условиям работы турбин (получение необходимой располагаемой мощности и т. п.). Если по турбинам допустима меньшая сработка, то ее и ограничивают уровнем, приемлемым для их работы. Такое ограничение сработки свойственно большинству средненапорных ГЭС на равнинных реках СССР.

Выбор установленной мощности

Изменение установленной мощности $N_у$ при ее выборе можно допускать за счет изменения или мощности всего агрегата (турбины и генератора), или только мощности генератора, которой ограничивается производительность турбины (см. верхний правый угол рис. 82).

При технико-экономических исследованиях мощностью $N_у$ обычно варьируют за счет изменения числа агрегатов одного и того же типа и размеров.

Выше отмечалось, что установленная мощность ГЭС в общем случае состоит из обеспеченной и необеспеченной. Величины той и другой зависят от степени регулирования стока, а также от хода нагрузок системы в течение года и по часам суток.

При полной невозможности регулирования стока (даже суточного) обеспеченная часть установленной мощности находится при помощи кривой обеспеченности минимальных расходов, построенной по ряду с числом членов, равным числу лет наблюдений. Такие кривые могут быть построены для характерных сезонов. Одним сезоном иногда обойтись нельзя, так как сезон, для которого требуются наибольшие мощности, может не быть лимитирующим по стоку. Наоборот, сезон с малыми потребными мощностями может оказаться наиболее напряженным в связи с резким снижением стока в это время.

Кривые обеспеченности минимальных расходов можно перестроить в кривые обеспеченности мощности простым изменением масштаба на оси ординат (с ограничением мощностей в начале

кривой соответственно характеристикам турбин). При этом мощность $N_{об}$, соответствующая заданной обеспеченности на кривой, является обеспеченной, а мощности, располагающиеся выше, должны быть дублированы мощностями других электростанций.

Для ГЭС, имеющей водоем суточного регулирования, среднесуточная обеспеченная мощность, как и в предыдущем случае, зависит только от гидрологической характеристики реки и от расчетной обеспеченности, а потому может быть найдена также по кривой обеспеченности минимальных среднесуточных мощностей (или по кривой обеспеченности минимальных расходов).

Обеспеченная энергия, вырабатываемая ГЭС в течение расчетных маловодных суток, составит $Э_{об} = N_{об} \cdot 24$ кВт·ч.

Вливая суточную энергию ГЭС в верхнюю часть суточного графика нагрузок рассматриваемого сезона (см. рис. 80), найдем обеспеченную часть мощности ГЭС. Дублирующие мощности на упомянутой кривой обеспеченности будут располагаться выше найденной пиковой мощности.

Часто встречаются водохранилища с емкостью, значительно большей, чем требуется для суточного регулирования, но недостаточной для регулирования мощностей с перераспределением их между сезонами, т. е. в пределах всего года. При этом емкость сохраняется для повышения мощностей в наиболее ответственные месяцы маловодного года (обычно в ноябре—феврале). В течение же всего теплого сезона ГЭС работает на естественных расходах с суточным регулированием. Этот сезон рассматривается особо в таком же порядке, как и для вышеприведенных случаев (построение кривой обеспеченности минимальных расходов или мощностей и определение расчетной мощности для заданной обеспеченности с учетом суточного регулирования). Наибольшая из потребных для энергосистемы обеспеченных пиковых мощностей обоих сезонов принимается за обеспеченную часть установленной мощности. Всякое дополнение $N_д$ (см. § 31) к этой обеспеченной части рассматривается как дублирующая мощность.

При наличии водохранилища годового регулирования требуется регулирование мощностей в расчетном маловодном году соответственно заданному годовому графику среднесуточных мощностей. Затем для средних по нагрузке суток каждого из двух—четырех сезонов по схеме на рис. 80 определяются обеспеченные пиковые мощности, которые откладываются на годовом графике суточных максимумов системы книзу от линии максимумов (см. рис. 83 *б*). Кривая, соединяющая концы отложенных ординат и отделяющая зону максимумов ГЭС, не должна располагаться параллельно упомянутой линии и не может быть горизонтальной. Она должна расположиться между двумя этими границами таким образом, чтобы можно было выполнить плановый ремонт агрегатов проектируемой ГЭС и других электростанций (при параллельном положении раздельной линии нельзя ремонтировать агрегаты ГЭС, при горизонтальном — остаются без ремонта тепловые агрегаты).

Поэтому регулирование среднесуточных мощностей по годовому графику нагрузок и баланс пиковых мощностей в течение года рассматриваются совместно.

В тех случаях, когда годовой график суточных максимумов системы таков, что в период малых нагрузок имеется достаточная площадь (число киловатт-часов) для размещения на ней энергии всех ремонтируемых агрегатов, недоданной ими за время простоя, т. е. если площадь провала на графике не меньше суммы произведений длительности ремонта каждого из агрегатов системы на его мощность (см. рис. 83 *б*), выполнение ремонтов возможно без резервных агрегатов. При этом необходимо лишь путем соответствующего регулирования водохранилищем ГЭС подобрать такой ход среднесуточных и пиковых мощностей в течение года, чтобы обеспечивался ремонт агрегатов, если для этого имеются возможности по конфигурации годового графика максимумов. В тех же случаях, когда ремонтная площадь на этом графике недостаточна, требуются дополнительные агрегаты, устанавливаемые в составе энергосистемы для замещения ремонтируемых.

При указанных расчетах по регулированию мощностей ГЭС следует проверять, не приводит ли тот или иной ход сработки водохранилища к потере располагаемой по напору мощности ГЭС, необходимой по графику пиковых нагрузок.

Полученная по принятому режиму регулирования пиковая мощность ГЭС, наибольшая из мощностей по всем сезонам маловодного года, является обеспеченной частью установленной мощности. Если на ГЭС устанавливается дополнительная к этой мощность, то она, будучи необеспеченной, является дублирующей мощностью. Поскольку дублирующая мощность всегда может быть заменена, для нее не только не требуется ремонтной площадки на годовом графике суточных максимумов, а наоборот, она сама может быть использована в качестве ремонтного резерва. Возможная величина дублирующей мощности ГЭС во всех рассматриваемых случаях определяется технико-экономическими расчетами. Для этого должны быть выполнены водноэнергетические расчеты по определению годовой энерговыработки ГЭС (средней за многолетие) при нескольких значениях установленной мощности и при известных остальных параметрах водохранилища и ГЭС (НПГ, глубина сработки, режим регулирования, обеспеченные среднесуточные мощности и т. п.).

Получив для всех вариантов установленной мощности средние за многолетие величины годовой энерговыработки ГЭС, можно построить график зависимости годовой выработки от установленной мощности (рис. 92). Отметим попутно, что с увеличением коэффициента регулирования стока дополнительная энерговыработка от увеличения установленной мощности уменьшается, а установленная мощность по своей величине все время приближается к обеспеченной пиковой. Наоборот, эффект по годовой энерговыработке становится более значительным при увеличении установленной мощности в случае малой степени регулирования стока.

Однако и при этом с увеличением мощности приращение энерговыработки постепенно затухает.

Пользуясь упомянутым графиком зависимости выработки от установленной мощности, находим приращение выработки на каждый дополнительно устанавливаемый (дублирующий) киловатт. При этом экономически предельно допустимая величина дублирующей мощности определяется по принятому сроку окупаемости n, который находится по соотношению, аналогичному формуле (73),

$$n = \frac{K_г}{И_т - И_г} \text{ лет}, \qquad (73')$$

где $K_г$ — полная величина начальных капиталовложений в дополнительную (необеспеченную) мощность ГЭС, не вытесняющую тепловой мощности; $И_т$ — эксплуатационные издержки по тепловой электростанции, включающие только топливную составляющую (дублирование мощности ведет только к экономии топлива, а амортизационные отчисления, зарплата персонала и т. п. остаются без изменения); $И_г$ — эксплуатационные издержки, относящиеся к дополнительной мощности ГЭС.

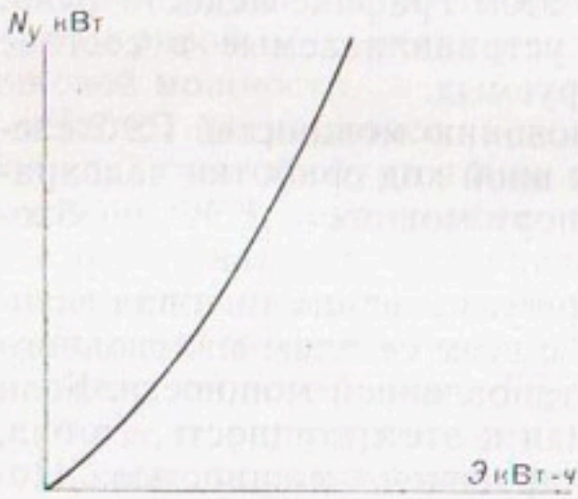


Рис. 92. Зависимость среднегодовой энерговыработки $Э$ кВт·ч от установленной мощности ГЭС $N_у$ кВт.

Определив таким образом технически и экономически целесообразную величину дублирующей части мощности и зная обеспеченную ее часть, а также потребность в резервах (§ 31), получаем полную установленную мощность ГЭС (по генераторам), если нагрузочный, аварийный и ремонтный резервы не относятся к ГЭС. В противном случае установленная мощность должна включать некоторые (или все) из этих резервных мощностей, которые по удобствам и возможностям энергосистемы могут быть отнесены к проектируемой ГЭС или к тепловым электростанциям.

Если ГЭС, работающая в системе, не всегда может покрыть нагрузку, равную ее установленной мощности (такие случаи бывают в паводок, см. табл. 78), то это еще не означает, что необходимо дублирование мощности. Важно лишь, чтобы в такие месяцы (когда нагрузки энергосистемы также снижаются) мощность, требуемая системой от ГЭС, не превышала той, которой она может располагать в это время. Низконапорные ГЭС на малых реках, работающие в системе или изолированно, во время половодья могут даже выходить из строя на одну-две недели из-за резкого снижения напора.

§ 35. ДИСПЕТЧЕРСКИЕ ГРАФИКИ, ЭНЕРГОБАЛАНСЫ И ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ ГЭС

Построение диспетчерской схемы работы ГЭС сводится к отысканию такого графика наполнений водохранилища во времени (в течение года), который позволяет, сохраняя обеспеченность среднесуточных мощностей по заданному годовому графику нагрузок, получать дополнительную мощность при избытках стока или заблаговременно переходить к снижению мощности в случае недостатка стока.

Характер расчетов и построений при этом аналогичен тем, которые выполняются для построения диспетчерского графика работы водохранилища для водоснабжения (см. гл. VII). Разница состоит лишь в том, что вместо расходов отдачи воды на графике приводятся величины мощности ГЭС.

При построении диспетчерского графика работы ГЭС, как и для случая водоснабжения, необходимо располагать длительным рядом величин стока, позволяющих проследить все многообразие возможных условий ее работы. Поэтому построение диспетчерского графика производится на основе рассмотрения серии кривых сработки и наполнения водоема для покрытия обеспеченных среднесуточных мощностей заданного годового графика нагрузок.

Кривые сработки строятся по стоку нескольких лет. В ряду этих лет должны быть годы с различным внутригодовым распределением стока, причем должны быть рассмотрены не только маловодные годы, так как часто в целом средние и даже многоводные годы имеют низкую межень или не очень низкую, но весьма затяжную по времени. Понятно, что те годы, в которые даже при полном использовании рабочей емкости не обеспечивается гарантированная мощность до наступления ближайшего половодья, должны исключаться при построении нормального диспетчерского графика. [Эти годы относятся к перебойным и рассматриваются при построении ветвей графика работы ГЭС за пределами расчетной обеспеченности; в расчетных условиях эти годы используются с учетом коэффициента приводки (см. § 18).]

Построение кривых сработки для каждого отобранного года начинается с нахождения переломной точки, означающей окончание опорожнения водоема и переход к наполнению. Такая переломная точка на диспетчерском графике в случае годового регулирования стока на ГЭС приходится на тот момент времени, когда среднесуточный расход после начала весеннего подъема по своей величине будет равен расходу для поддержания среднесуточной мощности на эту же дату по обеспеченному графику нагрузок ГЭС при минимальном напоре (т. е. при опорожненном водохранилище).

От переломной точки, начиная с опорожненного водохранилища и идя ходом назад, для каждого отобранного года на различные календарные даты, т. е. через определенные интервалы (например, через декаду, месяц), определяем, какой минимальный запас воды должен быть в водохранилище для того, чтобы,

дополняя естественный приток, он был достаточным для покрытия обеспеченного графика нагрузок от любой календарной даты до конца опорожнения. Результаты расчетов сработки для отобранных лет изображаются в виде кривых сработки, по которым строится верхняя огибающая, ориентируемая на более длительную сработку водохранилища (затяжная межень, запоздалое половодье) и принимаемая за основную ветвь опорожнения.

Точно так же строятся дополнительные кривые опорожнения, соответствующие увеличенным обеспеченным мощностям ($1{,}25N_{об}$, $1{,}50N_{об}$, $1{,}75N_{об}$, ..., $N_у$) при наполнениях водохранилища выше основной диспетчерской линии и уменьшенным мощностям ($0{,}80N_{об}$, $0{,}60N_{об}$ и т. д.) при сработке водохранилища ниже диспетчерской линии. Последние случаи означают начало перебоя, в связи с чем вводится постепенное снижение мощности для исключения более глубокого перебоя, хотя и менее продолжительного.

Построение кривых сработки для пониженной мощности производится по тем годам из фактического ряда наблюдений, которые вследствие малого объема годового или меженного стока (для небольших водохранилищ) выходят за пределы расчетной обеспеченности.

При небольшом водохранилище, наполнение которого весной обеспечивается при нормальной работе ГЭС даже в самые маловодные годы, построение кривых пониженной мощности необходимо только для зоны опорожнения. Если водохранилище относительно велико (приближается к объему, достаточному для полного годового регулирования стока, и поэтому не всегда может быть заполнено при обеспеченной работе ГЭС), кривые пониженных мощностей для случаев перебоя могут быть построены также и для периода наполнения водохранилища.

Дополнительные кривые повышенной и пониженной мощности привязываются на отметке ГМО к запоздалому опорожнению водохранилища. В условиях эксплуатации и при гидроэнергетических расчетах эти кривые могут показывать на каждый момент величину мощности, обеспечиваемой до конца года, т. е. до начала наполнения.

Основная ветвь наполнения строится аналогично основной ветви опорожнения, причем также должны быть исключены годы, в которые малый объем половодья не обеспечивает наполнения водохранилища до НПГ при работе ГЭС по обеспеченному графику. Для отобранных лет ходом вперед строятся кривые наполнения, также начиная от полностью сработанного водохранилища (т. е. от ГМО). Верхняя огибающая принимается за ветвь наполнения.

Обе ветви диспетчерского графика нанесены на рис. 93. В нижней части графика они пересекаются. Слой воды от ГМО до точки пересечения является резервом для случаев наиболее позднего начала половодья. Горизонтальное расстояние между нижними концами кривых есть интервал между наиболее ранней и наиболее поздней датами наступления половодья.

Показанная на рис. 93 ветвь наполнения (сплошная левая ветвь наполнения) соответствует наиболее раннему наполнению, поскольку оно происходит с самого начала половодья и при работе ГЭС по обеспеченному графику мощностей. В таком случае водохранилище заполняется наиболее быстро, следствием чего может быть излишний холостой сброс воды, т. е. недостаточное использование стока. Но при этом транзитные расходы, проходящие через ГЭС, если она не является низконапорной, используются на повышенных напорах за период половодья. Последнее обстоятельство является преимуществом рассмотренного варианта наполнения, в особенности при малых объемах водохранилищ.

Однако при водохранилищах со значительными объемами бывает выгодно заполнить емкости в более позднюю фазу половодья.

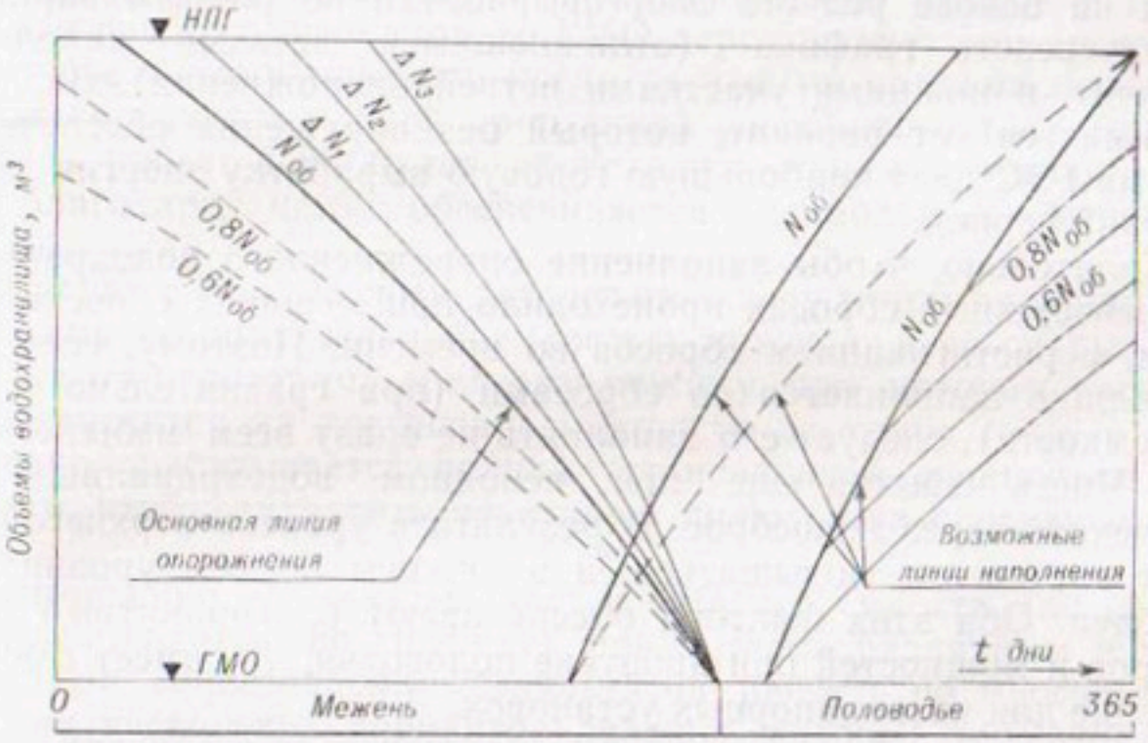


Рис. 93. Диспетчерский график для ГЭС с сезонным регулированием.

В таком случае достигается более полное использование стока, что может дать повышенную энерговыработку, хотя и при меньшем напоре за период половодья. Такое наполнение бывает благоприятным и для срезки пика половодья. Вариант ветви наиболее позднего наполнения может быть построен следующим образом. В каждом году на спаде половодья находится такой момент, когда при уровне водохранилища на отметке НПГ естественный расход реки как раз равен необходимому для поддержания обеспеченной среднесуточной мощности ГЭС на ту же дату. От этой точки ходом назад ведется наполнение водохранилища при поддержании обеспеченных мощностей. Полученные кривые наполнений обобщаются верхней огибающей (сплошная правая ветвь $N_{об}$ на рис. 93), которая может не пересекаться с ветвью опорожнения и даже находиться от нее на отметке ГМО на некотором расстоянии. Это означает, что ГЭС в течение небольшого отрезка времени работает при минимальном напоре (при ГМО).

Оба варианта построения ветви наполнения являются предельными — самый ранний и допустимо поздний. Но второй из этих вариантов содержит некоторую опасность ненаполнения водохранилища при неблагоприятной весне. В интервале между этими предельными вариантами возможны также и некоторые промежуточные. В качестве одного из таких дополнительных вариантов на рис. 93 показана ветвь наполнения (пунктирная линия), обобщающая весь интервал между крайними пределами и приемлемая для тех водохранилищ, которые даже в самые маловодные годы допускают работу ГЭС с повышенной среднесуточной мощностью (до установленной мощности включительно) без риска оставить водохранилище незаполненным.

Окончательный выбор варианта ветви наполнения производится на основе расчета энерговыработки по разным вариантам диспетчерского графика (отличающимся ветвями наполнения, а значит и нижними участками ветвей опорожнения). За основу принимается тот вариант, который без нарушения обеспеченного режима ГЭС дает наибольшую годовую выработку энергии за многолетний период.

Желательно, чтобы заполнение опорожненного водохранилища при неизбежных сбросах происходило при меньших сбросных расходах, с растягиванием сбросов во времени. Поэтому, если водохранилище заполняется со сбросами (при сравнительно небольшой емкости), следует его заполнять не сразу всем избытком притока. Часть избытка еще при неполном водохранилище надо пропускать через водосброс. В результате уровень верхнего бьефа будет постепенно повышаться, а в нижнем подъем уровня будет ослаблен. Оба этих фактора обеспечивают благоприятный режим напоров и мощностей при пропуске половодья, что имеет серьезное значение для низконапорных установок.

Совсем иная обстановка может наблюдаться в случаях полного использования избытков стока с начала половодья на заполнение водохранилища (при работе ГЭС с мощностями в пределах от обеспеченных до установленной). При сравнительно небольших водохранилищах низконапорных ГЭС это может вызывать перебои в работе ГЭС или ограничение мощностей по напору после наполнения, когда уровень верхнего бьефа повышается на 2—2,5 м (20% напора), а уровень нижнего бьефа на 5—6 м в результате концентрированных сбросов после наполнения водоема.

Изложенные в гл. VII соображения о календарной и скользящей шкалах времени для периода наполнения остаются в силе и при построении ветви наполнения водохранилища ГЭС.

Режим работы ГЭС по диспетчерскому графику аналогичен эксплуатации водохранилища на переменную отдачу. В любое время года при наполненном до НПГ водохранилище ГЭС пропускает полностью естественные расходы через турбины. Избытки притока, превышающие пропускную способность турбин, сбрасываются через водослив. Так продолжается до тех пор, пока приток

воды обеспечивает среднесуточные мощности, равные или бóльшие обеспеченных.

С того момента, когда расход становится меньше необходимого для поддержания обеспеченной среднесуточной мощности, начинается сработка водохранилища соответственно поддержанию этой обеспеченной мощности. Через любые интервалы времени мы можем сравнивать фактическое наполнение водохранилища с необходимым по диспетчерскому графику. Если при этом обнаруживаются избытки емкости, последние могут быть сработаны с увеличением мощности на все время до конца года. Однако если не требуется безотлагательного повышения мощности, то такая сработка водохранилища с повышением мощности на все время до конца года невыгодна. Желательно избыток емкости сохранять до конца года, обеспечивая лишь гарантированную мощность и приурочивая сработку избытков до ГМО перед половодьем (в идеальном случае к тому моменту, когда расход на подъеме половодья становится равным полной пропускной способности всех турбин). При этом работа ГЭС будет происходить при наибольших напорах, благодаря чему обеспечивается наибольшая выработка энергии.

На реках с несколькими паводками в году и при наличии водохранилища со значительной емкостью может оказаться выгодной сработка по некоторому среднему режиму, при котором часть избытка относится на повышение мощности до конца года, а часть ускоренно срабатывается полной установленной мощностью ГЭС для того, чтобы захватить некоторую долю стока следующего паводка.

Соотношение упомянутых частей избытка емкости (по сравнению с необходимой по графику) может быть различным и выявляется при сопоставлении результатов расчета по многолетнему ряду для нескольких вариантов деления, которые возможны как в виде постоянного соотношения для всего года (например, $^1/_3$ избытка отводится на повышение мощности, а $^2/_3$ усиленно срабатывается), так и в виде переменного в году соотношения для жестких календарных дат (например, возможны следующие соотношения для усиленной сработки избытков: на 1/V $^1/_3$, на 1/VIII $^1/_2$, на 1/XII $^2/_3$).

При наполнении водохранилища весной избытки емкости (сверх ветви наполнения), как и в интервале ветви опорожнения, принципиально выгодно относить к более позднему использованию, если это дает повышение среднего напора за весну, не ограничивает мощностей по напору и увеличивает энерговыработку. Однако кратковременность и интенсивность весенней фазы стока вынуждает начинать использование избыточного объема непосредственно при его обнаружении по ветви наполнения, чтобы избежать излишних потерь стока и энергии.

При многолетнем регулировании стока (и мощности) водохранилище срабатывается в течение ряда лет с разнообразными сочетаниями стока. Поэтому во избежание нарушения работы ГЭС

по обеспеченному графику вследствие непредусмотренного сочетания лет с различными объемами и распределением стока диспетчерское регулирование приходится вести только в пределах сработки по первому году периода опорожнения (рис. 94).

Если ГЭС за весь расчетный период опорожнения водохранилища до ГМО обеспечивает в каждом году покрытие некоторого годового графика среднесуточных нагрузок, то для этого в первый год требуются меньшие расходы за счет емкости водохранилища, а в последний — бóльшие, соответственно уменьшению напора. Годовой график нагрузок, обеспечиваемый водохранилищем с многолетним регулированием стока, определяется при этом несколькими приближениями с увеличением или уменьшением нагрузок,

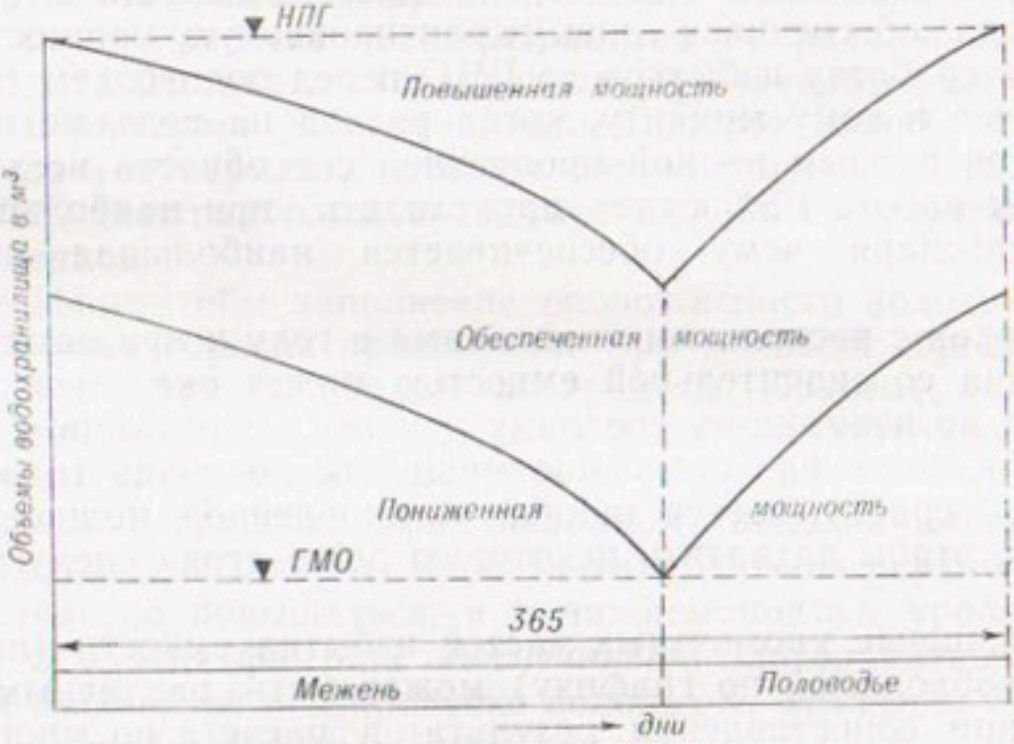


Рис. 94. Диспетчерский график для ГЭС с многолетним регулированием.

относимых к ГЭС (см. § 33). Обеспеченным будет тот график нагрузок, при котором водохранилище в конце *n*-летнего расчетного периода срабатывается до ГМО.

Для построения диспетчерского графика по первому году сработки выбирается несколько лет из фактического ряда, которые начиная с наполненного водохранилища до конца половодья следующего года и с учетом всех потерь воды из водохранилища обеспечивают покрытие графика нагрузок без существенных сбросов или незаполнений водохранилища. При этом допускаются приводки стока отдельных лет путем частичного изменения его умножением на коэффициент, близкий к единице, о чем указывалось в гл. VII. Окончательно принимается тот год и соответствующие ему кривые сработки и наполнения водохранилища, которые дают наиболее осторожное решение для диспетчерского регулирования (более высокое положение ветвей сработки и наполнения без учета исключительных, нетипичных случаев).

Очертание кривых, представляющих нижнюю границу обеспеченной сработки водохранилища, находится из покрытия того же графика нагрузок, но при минимальном напоре. Аналогично изложенному находятся годы (с учетом приводки), бо́льшие по стоку, чем для первого года сработки, и обеспечивающие покрытие графика нагрузок. При этом наполнение происходит начиная с ГМО до конца следующей весны, а сработка начинается с отметки, полученной к концу предыдущей весны, и продолжается до ГМО.

Как и в первом году, отметки уровня к началу сработки и концу наполнения должны быть одинаковыми. Окончательно здесь также принимается наиболее осторожный вариант (см. рис. 94).

Построение дополнительных кривых для постепенного понижения мощности при снижении уровня водохранилища за нижнюю границу сработки или для увеличения мощности при наполнениях, более необходимых по первому году маловодного периода, производится аналогично тому, как это делается для годового энергетического регулирования стока. Таким же в принципе остается и порядок использования избыточных запасов воды, образующихся в водохранилище, причем ГЭС в эксплуатационных условиях в зависимости от суточного расхода воды (энергии) работает в пиковой или полупиковой, или в базисной части графика нагрузок (см. рис. 81). Если ГЭС по располагаемой мощности и величине притока в состоянии выдать больше энергии, чем требуется потребителям, избыток энергии не осваивается (при наполненном водохранилище часть притока идет на сброс).

Рассмотрим пример построения диспетчерского графика [61].

Исходные данные по стоку: норма стока $Q_0 = 145$ м³/с, $\Gamma_0 = 4{,}58$ км³, $C_{v\Gamma} = 0{,}25$; средний сток половодья (апрель—июнь) $П_0 = 2{,}82$ км³, $C_{vв} = 0{,}25$; средний сток межени (июль—март) $М_0 = 1{,}76$ км³, $C_{vм} = 0{,}45$, в том числе: лето—осень (июль—ноябрь) 1,56 км³, $C_{vл} = 0{,}50$; зима (декабрь—март) 0,20 км³, $C_{vз} = 0{,}20$.

Формы гидрографов половодья и режим летне-осенних паводков неустойчивы. Половодье проходит за 40—80 дней в апреле—июле.

Данные по водохранилищу: НПГ = 50,0 м, ГМО = 40,0 м, МГВ = 38,5 м, $V_{общ} = 1{,}060$ км³; $F_{общ} = 82$ км², $V_{м.о} = 0{,}400$ км³, $V_{мгв} = 0{,}330$ км³.

Объем рабочей призмы равен 0,660 км³, или 14% среднего объема стока за год. Резервная призма (ниже ГМО) составляет 70 млн. м³ и используется только в конце зимы при запоздалых половодьях.

ГЭС пропускает расход, равный 235 м³/с, расчетный напор (при НПГ) $H = 28$ м, чему соответствует мощность турбин 52,6 тыс. кВт, мощность генераторов 50 тыс. кВт.

С учетом планового ремонта тепловых и гидравлических агрегатов энергосистемы средняя выработка ГЭС (в % от отдачи в декабре) распределяется следующим образом: зимние месяцы по

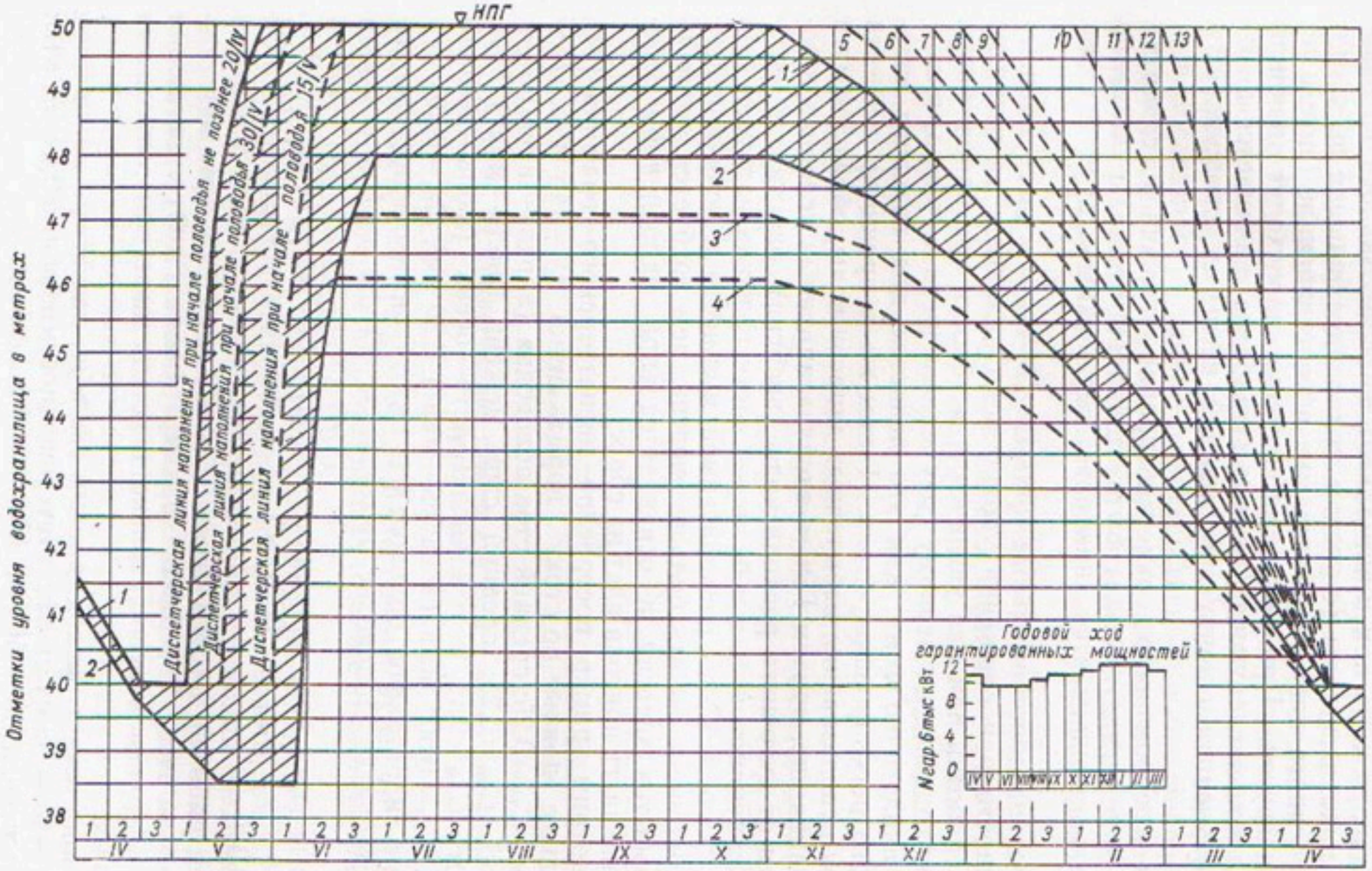


Рис. 95. Годовой график работы ГЭС с неглубоким сезонным регулированием.

1, *2* — верхняя (противоперебойная) и нижняя границы зоны гарантийного режима; *3*, *4* — нижние границы зон перебойной отдачи: $0{,}9N_{гар}$ и $0{,}8N_{гар}$; *5*, *6*, *7*, *8*, *9* — верхние границы зон повышенной отдачи: $1{,}1N_{гар}$, $1{,}2N_{гар}$, ..., $1{,}5N_{гар}$; *10*, *11*, *12* — то же для $2N_{гар}$, $2{,}5N_{гар}$, $3N_{гар}$; *13* — граница перехода к непрерывной работе всех турбин (противосбросовая линия). Заштрихована зона работы ГЭС с энергоотдачей $N_{гар}$ и при раннем начале половодья — не позднее 20/IV. Линия наполнения занимает место в зависимости от даты начала половодья.

100%, летние по 80%. При этом в межень маловодного года (P = =95%), среднемесячные гарантированные мощности ГЭС составляют: зимой (декабрь—февраль) 12 тыс. кВт, летом (май—июль) 9,6 тыс. кВт. ГЭС выполняет неограниченное суточное регулирование. Но при зимней сработке и уровнях водохранилища ниже отметки 47,0 м происходит падение располагаемой мощности. К концу сработки (при отметках 40,0—39,0 м) мощность снижается до 35 тыс. кВт, что не ограничивает режима сработки в связи со спадом нагрузок системы к этому времени.

Весной водохранилище заполняется до НПГ даже в самые маловодные годы. Затем до начала зимы ГЭС работает при НПГ на транзитном стоке, пользуясь запасами воды лишь для поддержания гарантийной отдачи, если приток недостаточен. Однако сработанный объем восполняется при ближайшем увеличении притока. Зимняя сработка начинается с 1/XI и ведется по диспетчерскому графику с расчетом опорожнения емкости до отметки 40,0 м к 20/IV. При поздней весне во избежание срыва гарантийной отдачи допускается сработка до отметки 38,5 м.

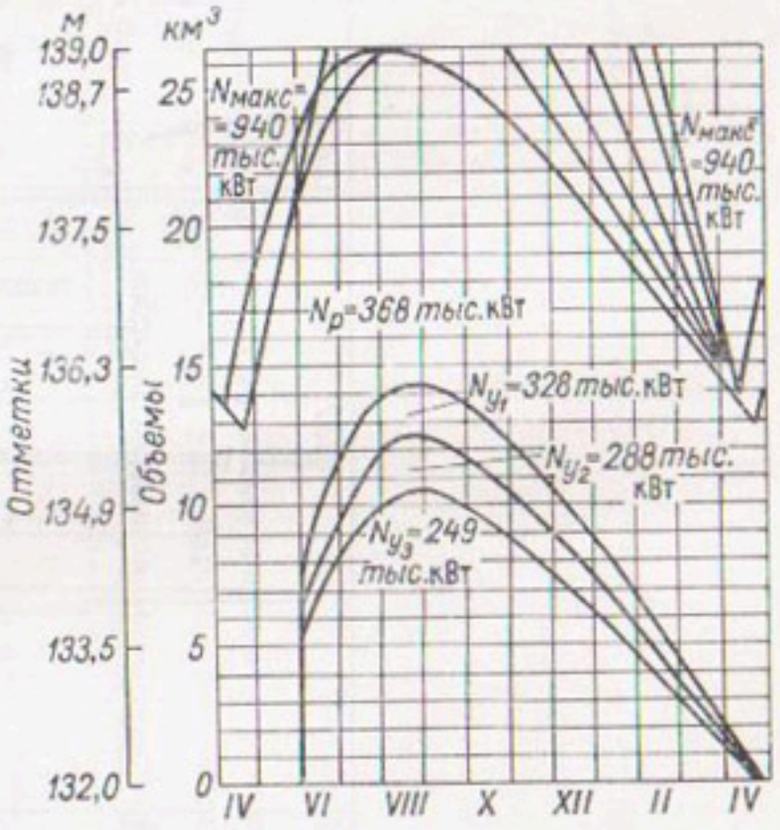
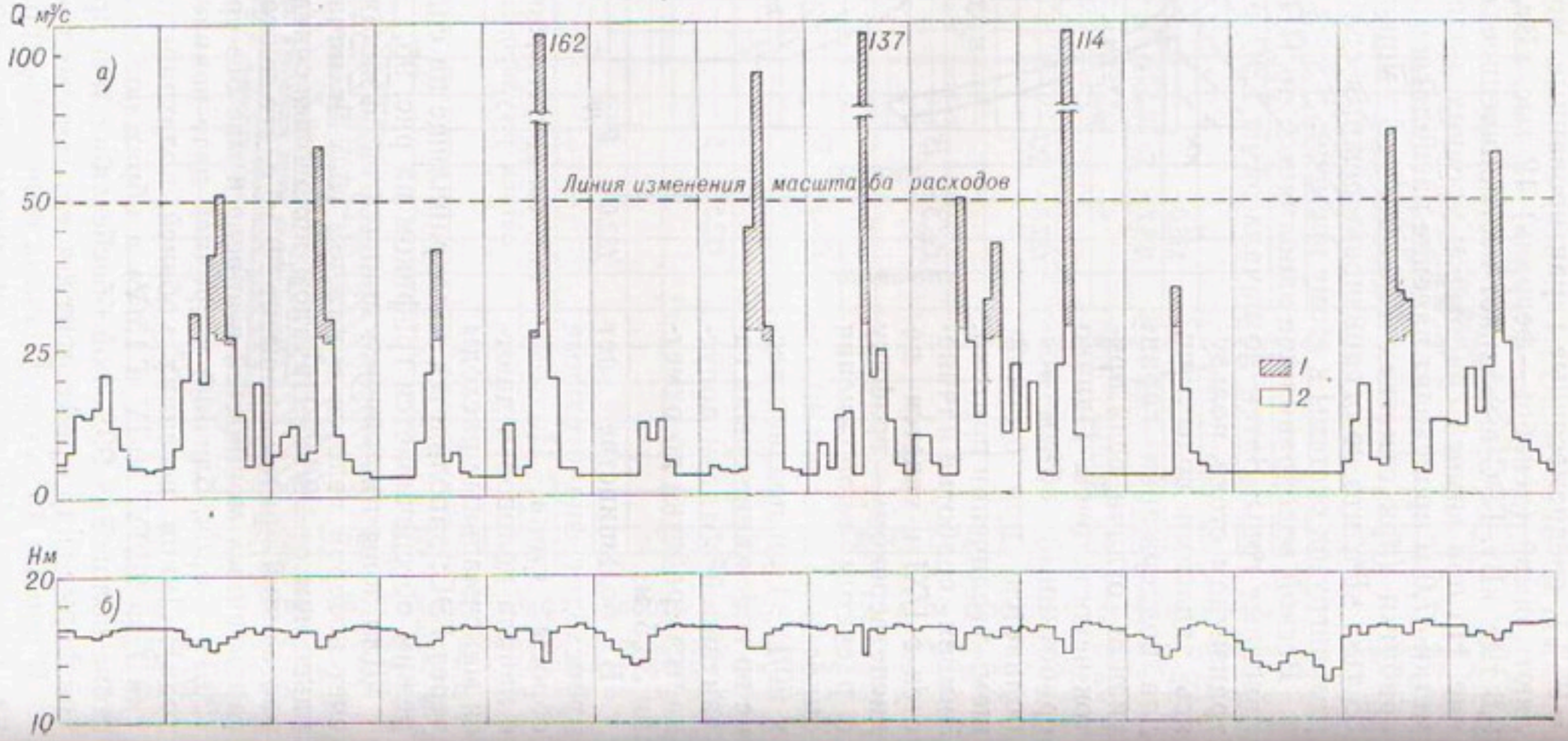


Рис. 96. Диспетчерский график при многолетнем регулировании мощности ГЭС.

В большинстве лет происходят значительные сбросы стока. Поэтому с начала половодья дают-ся максимальные расходы через ГЭС; заполняется водохранилище на спаде талых вод. Такой режим обеспечивается графиком на рис. 95.

Для зоны наполнения принята скользящая шкала времени, отсчет которой ведется в каждом году от начала половодья, но не ранее чем от 20/IV. Началом половодья считается дата, когда нарастающий приток превысит 60 м³/с, что достаточно для получения гарантийных мощностей в апреле и мае без сработки запасов воды (20/IV — срок, близкий к средней дате появления указанного расхода). Линии весенних уровней водохранилища (на рис. 95 линия *1* за 20/IV, 30/IV и 15/V) изображают ход его наполнения при стоке половодья 99%-ной обеспеченности и при наиболее невыгодной форме гидрографа притока.

В первые 14 суток с начала половодья уровень поддерживается на отметке 40,0 м, а затем повышается по графику, достигая НПГ на 35-е сутки половодья (для наполнения водохранилища


Q м³/с
100
50
25
0
а)
162
137
114
Линия изменения масштаба расходов
1
2
Нм
20
10
б)

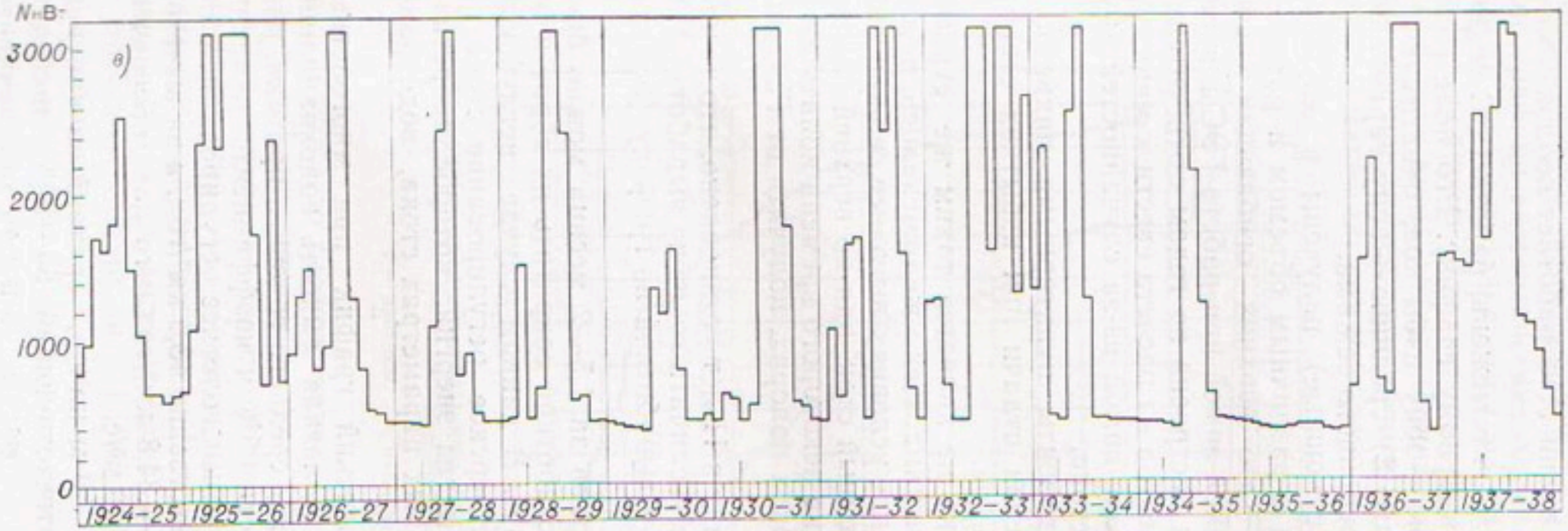


Рис. 97. Хронологические графики водноэнергетических характеристик ГЭС при НПГ = 85 м за период 1924-25—1937-38 гг.

1 — неиспользованный сток, *2* — использованный сток; *а* — зарегулированные расходы в нижнем бьефе, *б* — напоры, *в* — мощности.

в маловодном году требуется 20 суток). При наполнениях по графику левее и выше указанных линий ГЭС работает полной мощностью круглосуточно.

После заполнения до НПГ, т. е. в межень, работа ГЭС ведется не по скользящему, а по календарному графику. Его поле разделено на три зоны: 1) верхнюю — зону избытков, охватывающую зимний и предвесенний периоды; 2) среднюю — зону гарантийной отдачи и 3) нижнюю — зону перебойного режима.

Основные линии графика (сплошные) получены в результате анализа хода сработки в годы с различным объемом и распределением стока. Верхняя линия — это верхняя огибающая кривых хода уровней в годы с маловодной зимой при работе ГЭС в гарантийном режиме. Нижняя линия построена по годам с относительно высоким зимним стоком и проведена из расчета свести к минимуму вероятность перебоя энергоотдачи зимой из-за случайностей внутрисезонных колебаний речного стока.

Крайние области графика разбиты пунктирными линиями на подзоны для плавного увеличения отдачи при избытках стока и снижения ее при появлении перебоя.

Расходование избытков стока не является таким же строгим, как соблюдение гарантийного режима. Как уже отмечалось, в зависимости от того, что в конкретных условиях выгоднее, можно либо непрерывно срабатывать избыточный сток, идя по верхней границе гарантийной зоны, либо в течение некоторого времени копить избыточную воду, а затем, при высоких напорах, получить от ГЭС значительно увеличенную отдачу.

Из расчетов по стоковому ряду в 11 лет установлено, что точный прогноз половодья позволил бы увеличить годовую выработку ГЭС в среднем на 3% по сравнению с выработкой по графику (без прогноза).

При прогнозе осенних паводков за 1,5—2 месяца можно было бы предварительно усиленной сработкой сократить их сброс и повысить выработку еще на 2—3%. В данном случае неглубокого сезонного регулирования диспетчерское регулирование стока позволяет освоить 95—97% количества энергии, которое теоретически можно получить при заданных параметрах стока, водохранилища и гидростанции.

На рис. 96 показан диспетчерский график при многолетнем регулировании мощности [12]. Полезная емкость водохранилища ГЭС составляет 26,4 км³, или 53% среднего годового притока, равного 49,5 км³. При обеспеченности 95% и коэффициенте изменчивости стока $C_{vr}=0{,}20$ выполняется многолетнее регулирование с отдачей брутто $\alpha=0{,}88$, или соответственно 43,5 км³/год, а за вычетом прочих отъемов воды и потерь — 34,8 км³/год, что дает обеспеченный расход нетто на ГЭС $Q_P=1100$ м³/с.

При высоте сливной призмы 7,0 м напор, средний за критический период сработки, т. е. соответствующий 50—60% полезной емкости, равен 39,2 м. Указанные расход и напор обеспечивают мощность 368 тыс. кВт.

Кроме диспетчерских графиков, к основным документам, характеризующим особенности режима ГЭС, относятся хронологические графики энергетических характеристик ГЭС (рис. 97) и кривые их продолжительности (рис. 98).

В дополнение к характеристикам, приводимым на рис. 97 и 98, могут быть даны также хронологические графики максимальных пиковых мощностей при суточном регулировании и соответственных им минимальных напоров, графики колебания уровней верх-

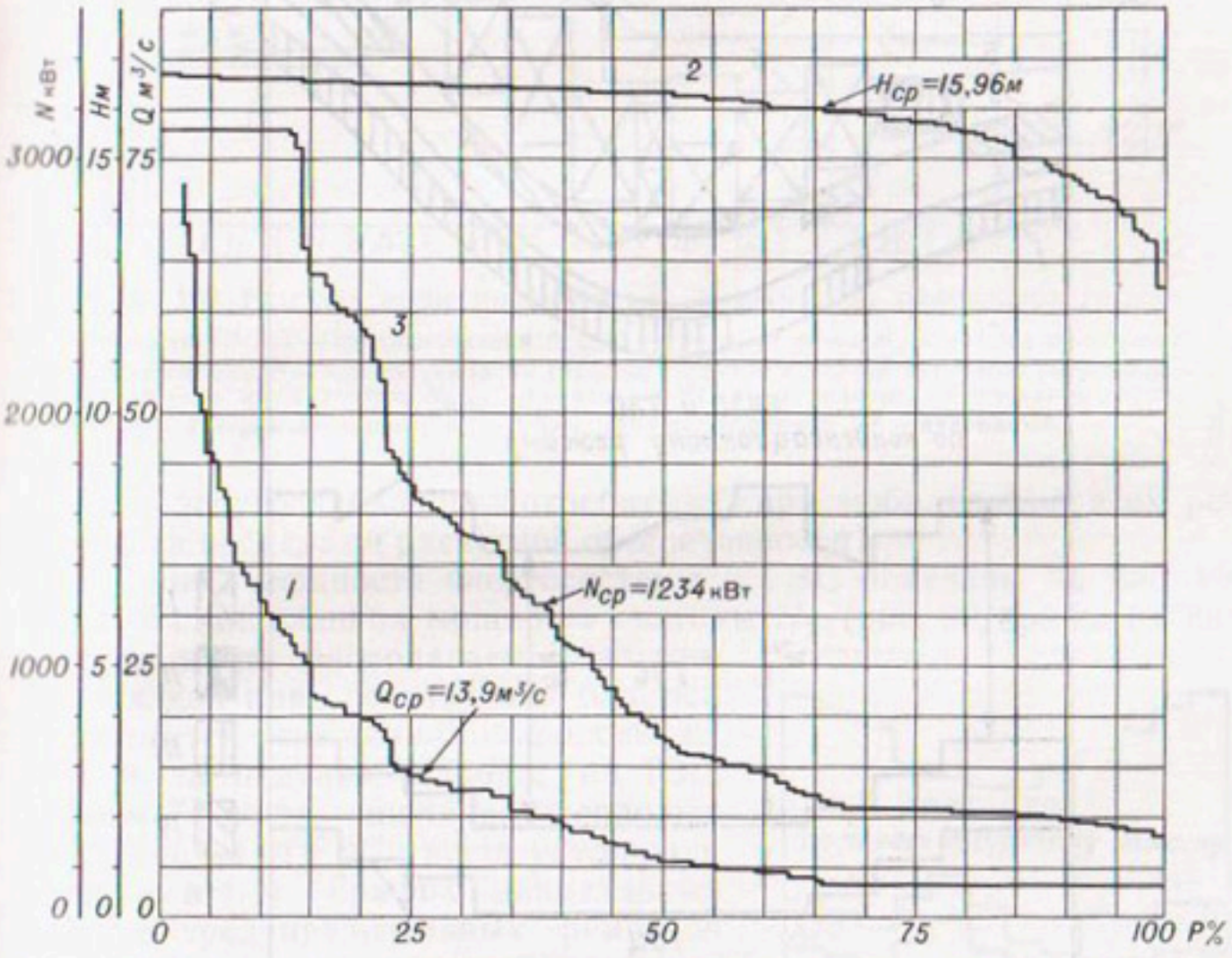


Рис. 98. Кривые продолжительности водноэнергетических характеристик ГЭС при НПГ=85 м.

1 — расходы, *2* — напоры, *3* — мощности ГЭС.

него и нижнего бьефов, кривая продолжительности величин годовой выработки энергии и т. п.

Для контроля обеспеченности энергосистемы мощностями и энергией установок (вместе с проектируемой ГЭС) составляются годовые балансы мощности N и энергии $Э$ по месяцам. Такие балансы являются иллюстрацией ведения хозяйства энергосистемы и помогают обнаружить избыток (или дублирование) мощностей или дефицит их.

По эксплуатируемым системам годовые балансы $Э$ и N составляются для выяснения следующих условий: а) электроснабжения в предстоящем году; б) присоединения новых потребителей;

в) обмена мощностью и энергией со смежными системами; г) определения необходимого количества топлива; д) составления графика вывода агрегатов в ремонт. Эти балансы строятся при обеспеченности стока $P=50\div75\%$.

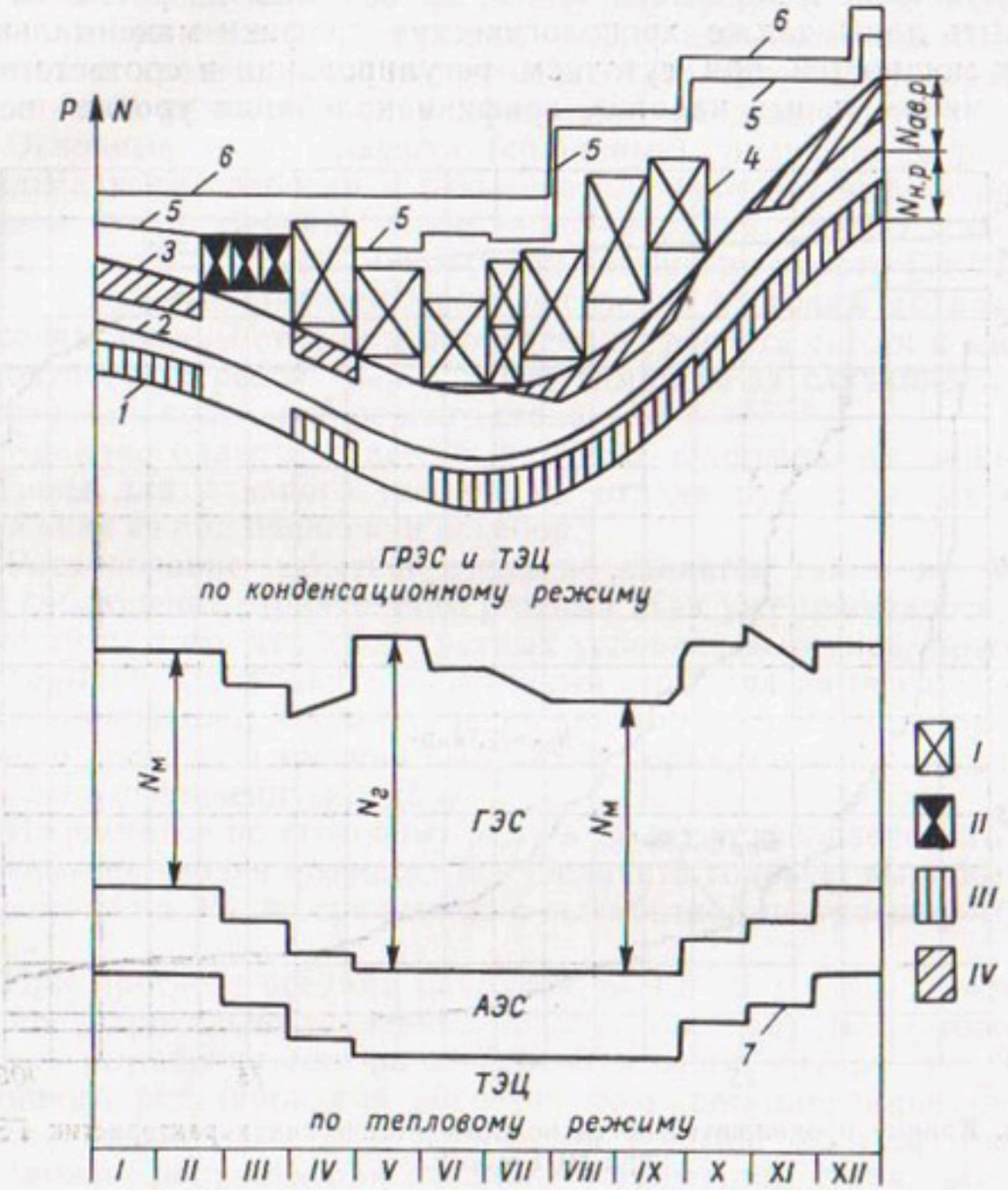


Рис. 99. Годовой баланс мощности энергосистемы в расчетном маловодном году.

1 — месячные максимумы нагрузок системы с учетом потерь в сетях и собственных нужд станции, *2* — то же с учетом нагрузочного резерва $N_{н.р}$, *3* — необходимая располагаемая мощность (линия *2* плюс аварийный резерв), *4* — график ремонтов, *5* — суммарная располагаемая мощность, *6* — рост установленной мощности в году; *7* — вынужденный режим ТЭЦ; ремонты агрегатов: *I* — по ТЭС, *II* — по ГЭС; резервы ГЭС: *III* — нагрузочный, *IV* — аварийный.

При проектировании ГЭС годовые балансы $Э$ и N составляются для проверки выбранных параметров ГЭС и контроля условий ее работы в энергосистеме в расчетный маловодный и средний годы. Для крупных ГЭС иногда такие балансы составляются также для характерного многоводного года (с целью выявления

возможности использования энергии ГЭС, максимальных потоков $Э$ и N по линиям передач, условий работы ГЭС при больших половодьях) и для крайне маловодного года (с целью выявления

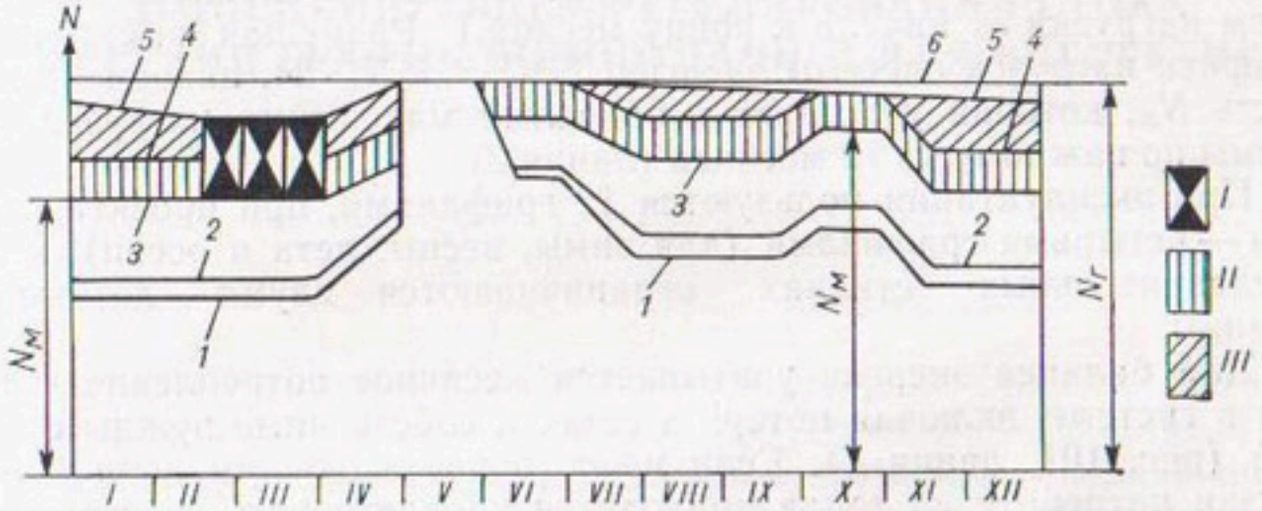


Рис. 100. Использование мощности ГЭС в расчетном маловодном году.

Мощности ГЭС: *1* — среднемесячная $N_{ср}$, *2* — среднесуточная $N_с$ с учетом недельного регулирования, *3* — используемая на графике нагрузок с учетом суточного регулирования, *4* — то же с учетом $N_{н.р}$, *5* — располагаемая по напору, *6* — установленная; *I* — ремонт агрегатов; резервы: *II* — нагрузочный, *III* — аварийный.

степени энергоснабжения потребителей при мобилизации всех резервов за пределами расчетной обеспеченности).

Балансы мощности энергосистемы и ГЭС показаны на рис. 99 и 100. Установленная мощность системы $N_у$ (рис. 99, линия *6*) несколько выше располагаемой (линия *5*), так как при составлении баланса учитывается снижение мощности: на ГЭС из-за падения напора, на ТЭЦ (линия *7*) из-за снижения тепловых нагрузок, на ГРЭС из-за ухудшения вакуума и т. п. График капитальных планово-предупредительных ремонтов приурочивается к периоду пониженных нагрузок и не должен выходить за линию *5*. Ремонт агрегатов планируется: для ГЭС на период межени, чтобы не вызывать холостых сбросов воды, для ТЭЦ на период пониженных тепловых нагрузок, для атомных (АЭС) соблюдаются особые условия. Текущие ремонты проводятся обычно в дни недели с пониженной нагрузкой. Если при этом капитальные ремонты всех агрегатов можно провести за счет сезонного снижения нагрузки, то система может не иметь ремонтного резерва, что и показано на рис. 99. При малом сезонном снижении нагрузки мощность $N_у$ системы приходится увеличивать по условиям ремонта, который в таком случае проводится почти в течение всего года.

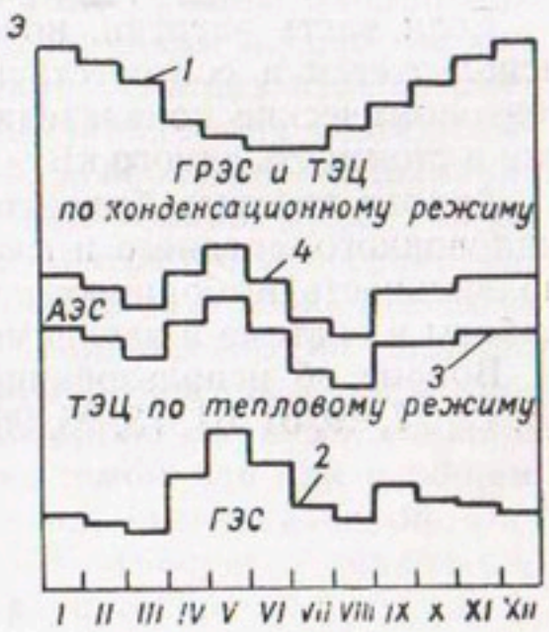


Рис. 101. Схема годового баланса электрической энергии энергосистемы.

Рисунок 100 показывает полноту использования ГЭС в системе. Среднесуточная мощность ГЭС N_c (линия *2*) в максимальный по нагрузке день месяца определяется на основе расчетов месячного и недельного регулирования. (Первое из них обусловлено изменением нагрузки от начала к концу месяца.) Размещая на суточном графике нагрузок системы энергию ГЭС $Э_c = N_c \cdot 24$, находим мощность $N_м$, которая участвует в покрытии максимума нагрузок системы по каждому из 12 месяцев (линия *3*).

При эксплуатации пользуются 12 графиками, при проектировании — четырьмя графиками (для зимы, весны, лета и осени), а на предварительных стадиях ограничиваются двумя — летним и зимним.

Для баланса энергии учитывается месячное потребление энергии в системе, включая потери в сетях и собственные нужды станций (рис. 101, линия *1*). Если из-за недостаточности ночной нагрузки потребителей тепла приходится удовлетворять за счет острого пара, а на ГЭС без регулирования стока бывают неизбежные холостые сливы воды ночью, то в расчет вводится только полезно используемая энергия ГЭС и ТЭЦ (по графикам нагрузки). При этом выработка ГЭС (рис. 101, линия *2*) принимается по водохозяйственным расчетам; выработка ТЭЦ с вынужденным тепловым режимом — по годовым графикам тепловой нагрузки и характеристикам агрегатов; выработка ГРЭС и конденсационной части ТЭЦ — из покрытия характерных суточных графиков нагрузки. Одновременно устанавливается годовое число часов использования для всей системы $T = \sum Э / \sum N_у$ и для каждой электростанции.

Если часть энергии, которую в состоянии выработать ГЭС, не используется и соответствующий объем воды сбрасывается, энергоэкономические показатели ГЭС (среднегодовая выработка энергии и стоимость одного кВт · ч) корректируются.

Анализ годовых балансов мощности и энергии для расчетного маловодного, среднего и многоводного годов позволяет определить правильность выбранных параметров ГЭС и выяснить условия ее работы в системе в зависимости от водности года.

Вопрос об использовании водной энергии изложен в работах [5, 12, 27, 29, 51, 61, 73, 95, 96, 99, 129, 132, 143].

Глава XI

РАСЧЕТЫ СИСТЕМЫ УСТАНОВОК ПРИ НЕЗАВИСИМОМ И КОМПЕНСИРУЮЩЕМ РЕГУЛИРОВАНИИ СТОКА НА ЖЕСТКИЙ ГРАФИК ВОДООТДАЧИ И ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

К проектированию системы установок возможен двоякий подход: 1) каждая установка может рассматриваться как самостоятельный источник, снабжающий водой или энергией определенных потребителей; 2) все установки обслуживают общего потребителя, взаимно заменяя друг друга. Последнее особенно типично для ГЭС, работающих в каскаде или даже на разных реках, но объединенных линией электросвязи. Имеются также комбинированные системы водоснабжающих установок (Донбасс, Криворожье, Северный Казахстан и др.).

При совместной работе установок водохозяйственный план каждой из них должен составляться так, чтобы достигался наибольший суммарный эффект каскада. При этом режим наполнения и сработки водохранилищ не совпадает с порядком их работы как самостоятельных источников водоснабжения. Полная взаимозаменяемость источников достигается в тех случаях, когда водоприемник располагается при нижней установке, а верховые водохранилища дают к нему попуски. При этом наибольший водохозяйственный эффект для системы будет при очередности сработки, начиная с нижнего водохранилища и последовательно переходя к более отдаленным ступеням каскада. Наполнение же должно происходить начиная с верховых ступеней до низовой. Для каскада ГЭС такой очевидной очередности сработки и наполнения водохранилищ не существует. Более приемлемой для них в общем случае бывает очередность, противоположная вышеуказанной. Однако в конкретных условиях по каскаду ГЭС требуется анализ порядка использования водохранилищ (см. § 38).

Расчеты компенсирующего и каскадного регулирования при работе установок в режимах, различных по природным условиям и требованиям потребителей, бывают довольно сложными. Поэтому в каждом конкретном случае следует выбрать достаточно надежный и доступный метод расчета.

Для основных схем регулирования ниже изложены приемы расчетов вероятностных и по календарному ряду стока. Первый из них, хотя и применим для исследования режима работы ГЭС, однако распространения в этой области не получил.

Следует отметить, что обобщенные приемы водохозяйственного и водноэнергетического расчетов сложного взаимодействия каскада установок используются в основном для приближенной оценки главных характеристик регулирования стока: обеспеченной и суммарной отдачи. При детальном проектировании они должны сочетаться с исследованием режима каскадов по стоку характерного ряда лет, что помогает обнаружить и проанализировать возможные критические комбинации наполнений, зарегулированных расходов, напоров, мощностей и т. п. Важным средством выявления таких комбинаций становится метод Монте-Карло (см. § 11) и приемы оптимизации решений [46, 96, 129].

§ 36. КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА СИСТЕМОЙ ВОДОХРАНИЛИЩЕ — ВОДОЗАБОР

Рассмотрим работу водохранилища, обеспечивающего водопотребление у водоприемника, расположенного ниже по реке и замыкающего дополнительный частный водосбор с существенным стоком, незарегулированным и потому используемым в первую очередь. По определению (см. § 9), компенсирующее регулирование сводится к созданию необходимых добавок из водохранилища на ниже расположенный участок реки соответственно режиму промежуточного стока и водопотребления у низового водозабора.

Водопотребление должно включать расходы воды, пропускаемые для питания участка реки ниже водоприемника и называемые иногда «санитарными» попусками. Размеры их зависят от характера использования реки и обычно принимаются близкими к естественному минимуму стока на этом участке, поскольку к нему приспособлены местное население и другие водопользователи (учитывается величина потока, уровни заложения водозаборов и т. п.).

Сравнивая сток с нижнего частного водосбора и водопотребление (рис. 102 *а*), находим дефициты воды, которые представляются в виде графика попусков из водохранилища (рис. 102 *б*) и рассматриваются как его полезная отдача, на которую оно рассчитывается. Отдача в таких случаях весьма неравномерна. В маловодные периоды требуются большие попуски, а в многоводные они снижаются до нуля, так как сток с частного водосбора покрывает потребность.

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

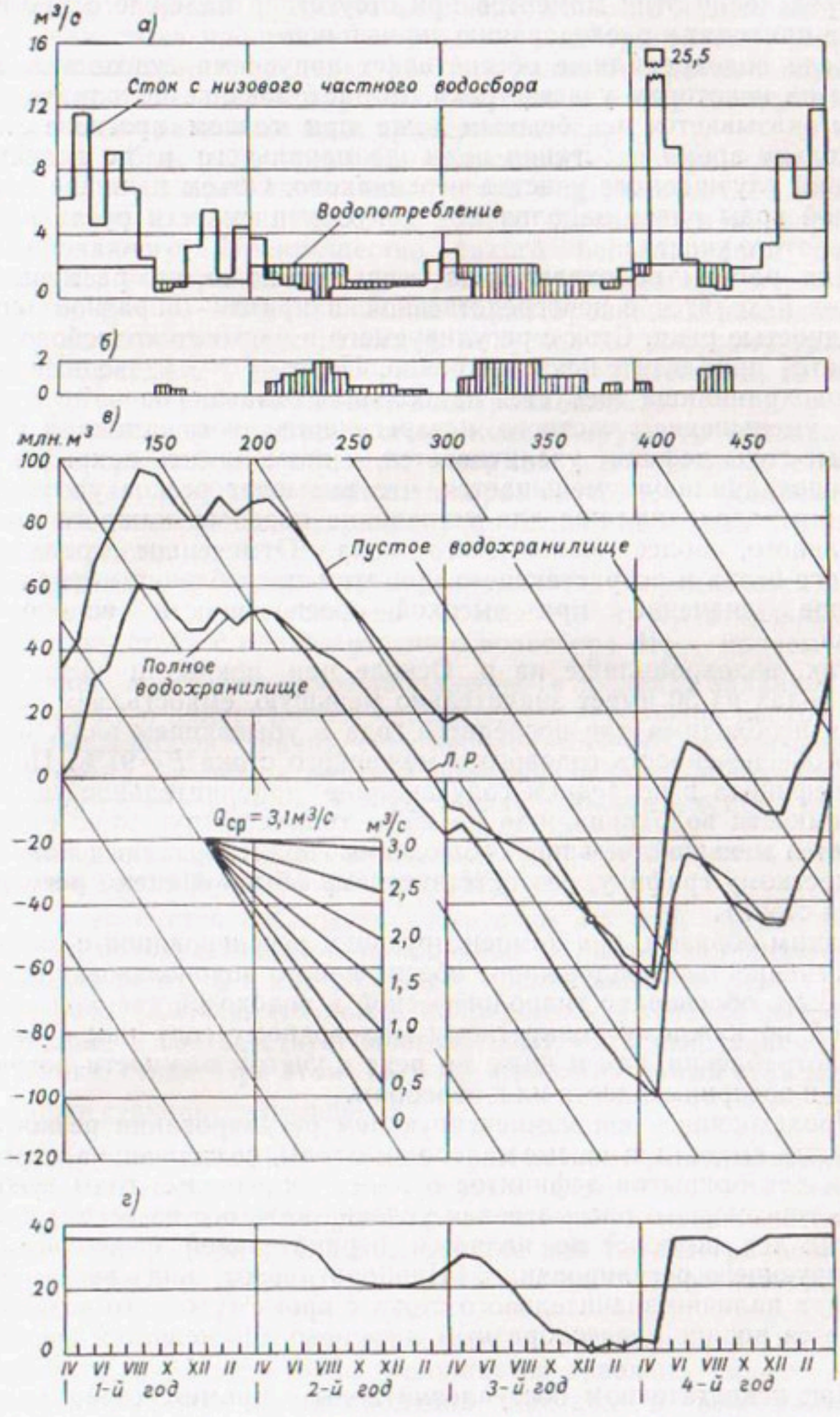


Рис. 102. Расчет емкости компенсирующего водохранилища на интегральных кривых.

а — график стока с частного водосбора и водопотребления, *б* — попуски из верхнего водохранилища, *в* — его работа (*Л. Р.* — линия регулирования), *г* — ход сработки и наполнения.

в определении этих моментов при отсутствии надежного прогноза стока приводят к расходованию лишней воды.

Если водохранилище обеспечивает попусками судоходные глубины на некотором участке реки, то расходование дополнительной воды оказывается неизбежным даже при точном прогнозе стока, поскольку время добегания воды до начального и до конечного сечений улучшаемого участка неодинаково. Объем излишне расходуемой воды равен заполняемой попусками емкости русла в пределах этого участка.

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

С уменьшением частного незарегулированного стока в маловодные годы дефицит увеличивается, а возможность покрытия его из водохранилища уменьшается, что вызывает резкое увеличение емкости водохранилища для устранения перебоев каждого дополнительного, более маловодного года. Отмеченное совпадение низкого стока и возрастающего при этом потребления имеет особо важное значение при высокой обеспеченности водопользования.

Так, водохранилище на р. Осколе при покрытии дефицитов в 49 годах из 50 имеет значительно меньшую емкость, чем та, которая необходима для последнего года в убывающем ряду, имеющего обеспеченность годового и меженного стока $P=97\%$. Покрытие дефицита в последнем году вызвало дополнительное увеличение емкости водохранилища на 25% (однако при этом емкость остается меньшей, чем при соблюдении гарантированных попусков по жесткому графику, соответствующему обычной схеме регулирования стока).

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

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

При недостаточном поступлении воды с промежуточного водосбора водохранилище дает попуски для соблюдения заданного расхода воды у водозабора. Когда промежуточный сток вполне доста-

точен для покрытия потребности в воде, а иногда даже с избытком (излишки стока пропускаются вниз по реке транзитом), незарегулированный сток в пределах расхода воды, отбираемой водозабором, идет в счет гарантируемых попусков к этому створу, в связи с чем в водохранилище вода придерживается.

Таким образом, с помощью попускового водохранилища некоторая часть незарегулированного стока с промежуточной площади бассейна из категории необеспеченного переводится в разряд гарантированного. Преимущество такого регулирования состоит в том, что водохранилище обеспечивает у водозабора значительно большие (на 30—50%) величины гарантированных расходов, чем то же водохранилище с режимом попусков по жесткому графику. Если же расходы у водозабора оставить без изменения, то можно соответственно снизить емкость водохранилища.

В зависимости от объема стока, контролируемого водохранилищем (по сравнению с объемом — нормой всего годового стока до водозабора), и объема дефицита промежуточного обеспеченного стока компенсирующее регулирование бывает сезонным (годовым) и многолетним.

В первом случае емкость водохранилища определяется по режиму попусков соответственно обеспеченному за отдельный год меженному стоку с промежуточного водосбора $M^{(1)}_{Рн}$, причем водохранилище имеет ежегодное заполнение (в пределах заданной обеспеченности) и поддерживает сравнительно небольшой расход у низового водозабора. Значит, если необходимый объем обеспеченных попусков $A_{к.п}$ вместе с местной полезной отдачей водохранилища $A_{м.п}$ и потерями из него $\sum q$ составляют $A_{бр}=\alpha Г_0 \leqslant Г^{(1)}_{р}$, то регулирование — сезонное (годовое) и располагаемый сток межени с промежуточного водосбора равен $M^{(1)}_{Рн}$.

Если требуется соблюдать достаточно высокий расход за межень, то водохранилище в маловодное n-летие заполняется не в каждую весну, а с наступлением последующей межени продолжает срабатываться, что может наблюдаться в течение нескольких лет подряд и соответствует многолетнему компенсирующему регулированию стока. При этом $A_{бр} > Г^{(1)}_{р}$ и располагаемый сток межени $M_н$ также становится больше $M^{(1)}_{Рн}$.

Необходимость сезонного или многолетнего регулирования выявляется по гидрометрическим данным отдельных или смежных наиболее маловодных лет путем пробного регулирования стока водохранилищем (при табличном расчете или по интегральной кривой) с покрытием дефицитов промежуточного стока у низового водозабора.

Расчет сезонного, как и многолетнего, регулирования по фактическому ряду величин стока выполняется довольно просто, путем последовательного балансирования притока в водохранилище и к водозабору с учетом потребления и попусков, потерь и сбросов в обоих створах, как показано С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем

[61]. При этом выявляется необходимая емкость водохранилища и режим его работы.

Компенсирующее регулирование применяется также в гидроэнергетике.

Годовое компенсирующее регулирование стока

Пусть для расчетного года известна его гидрологическая характеристика, приведенная в табл. 79 [73]. Требуется найти максимальный возможный зарегулированный (равномерный в течение года) расход у ГЭС, а также необходимый для этого объем водохранилища.

Таблица 79

Расходы воды у плотины и у ГЭС, м³/с

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	Год
Расход в створе плотины водохранилища	390	261	65	63	45	31	43	28	22	21	20	21	84
Расход у ГЭС	831	514	130	123	95	66	81	59	44	43	40	42	172
Дополнительный приток . . .	441	253	65	60	50	35	38	31	22	22	20	21	88

Поскольку подпорный бьеф ГЭС имеет только недельное и очень слабое сезонное регулирование, то в зимнее время она работала бы лишь на среднемесячных расходах 40—44 м³/с. Посмотрим, какую выгоду дает использование эффекта компенсации.

Средний расход у ГЭС за 10 месяцев межени равен 72 м³/с (объем стока $1{,}897 \cdot 10^9$ м³), следовательно, для поддержания среднегодового расхода 172 м³/с необходимо добавлять из водоема $172 - 72 = 100$ м³/с, что составляет за меженный период $2{,}63 \cdot 10^9$ м³. Объем стока за половодье составляет только $1{,}714 \cdot 10^9$ м³, что недостаточно для полного выравнивания стока у ГЭС в рассматриваемом году. Если весь этот объем задержать в водохранилище, то в течение межени можно располагать у ГЭС транзитным стоком $1{,}897 \cdot 10^9$ м³ и запасом в водохранилище $1{,}714 \cdot 10^9$ м³, что вместе составляет $3{,}611 \cdot 10^9$ м³. При этом зарегулированный расход ГЭС в межень будет составлять 138 м³/с, а весной в среднем 253—441 м³/с.

При неравномерном водопотреблении в году ход решения остается тем же.

В рассмотренном примере при равномерном попуске из водохранилища в межень его отдача была бы равна $1{,}714 \cdot 10^9 : 2{,}63 \cdot 10 \times \times 10^6 = 65$ м³/с, а расчетный расход у ГЭС зимой $Q_р = 65 + 40 = = 105$ м³/с. В результате использования эффекта компенсации повышение расхода воды в створе ГЭС составило

$$\left(\frac{138}{105} - 1\right) \cdot 100 = 32\%.$$

Многолетнее компенсирующее регулирование по календарным рядам стока

Для определения емкости водохранилища строится интегральная кривая стока с нижнего водосбора, принимаемая за линию полного водохранилища. К ней следует пристроить, нанося по ходу времени, линию регулирования — интегральную кривую попусков, а затем исходную кривую сместить вверх, до касания с линией попусков, т. е. провести линию пустого водохранилища.

Расстояние между исходной и контрольной линиями дает в масштабе объемов необходимую емкость водохранилища (рис. 102 *в*). Режим его работы показан на рис. 102 *г*.

Обратная задача — по известной емкости найти размеры водопотребления — решается путем подбора. Задаются варианты водопотребления; для них по вышеизложенному определяют объемы водохранилища; связь объемов и водопотребления дает искомое решение.

Пример (по данным работы [61]). Водохранилище регулирует сток, норма которого равна 1,7 м³/с. Отдача в виде попусков передается к ниже расположенному водоприемнику. Нерегулируемый частный сток в его створе оценивается нормой 3,3 м³с (за 4 года $Q_{ср}=3{,}1$ м³/с). Водоприемник обеспечивает подачу воды в апреле—сентябре 2 м³/с, октябре—марте 1 м³/с, а всего за год около 47 млн. м³ (для упрощения расчетов потери воды из общей отдачи не выделены).

Расчет регулирования выполнен по 4-летнему маловодному периоду (рис. 102, табл. 80). Необходимая полезная емкость оказалась равной 35,5 млн. м³. Сработка ее длится 20 месяцев с частичным пополнением в середине периода. В декабре года № 3 водохранилище будет исчерпано. По интегральным кривым находим, что эта емкость при равномерных попусках могла бы обеспечить расход ~ 1 м³/с или в теплый сезон 1,4 м³/с, а в холодный 0,7 м³/с вместо расходов при компенсирующем режиме соответственно 2 и 1 м³/с. В данном случае такой режим, позволяя использовать негарантированные повышения стока с нижнего водосбора в качестве гарантированных, повышает эффективность работы системы в 1,5 раза.

Обеспеченность работы установки можно приближенно оценить, если подсчитать объемы стока за скользящие интервалы: год плюс межень или 2-летки, а затем по статистическим параметрам этих рядов (при $C_v^{(2)}=C_{vr}:\sqrt{2}$) определить модульный коэффициент и соответствующую ему обеспеченность по таблицам Крицкого и Менкеля или Рыбкина. Можно эти ряды (в убывающем порядке) нанести на график с определением эмпирических обеспеченностей по формулам (9) и (10).

Понятно, что если водохранилище той же емкости расположить в створе водоприемника, то отдача была бы еще большей в результате регулирования избытков частного стока, которые ранее уходили на сброс.

Таблица 80

Расчет компенсирующего регулирования расходов воды у нижнего водозабора

№ года	Месяц	Потребление воды, м³/с	Расход воды нижнего водосбора, м³/с	Требуемый попуск из водохранилища, м³/с	Расход воды верхнего водосбора, м³/с	Расход воды, м³/с		Холостой сброс, м³/с	Объем воды, изъятый из водохранилища к концу месяца, млн. м³
						пополняющий водохранилище	забираемый из водохранилища		
1	I	1,0	5,5	0	2,8	—	—	2,8	0
	II	1,0	1,3	0	0,7	—	—	0,7	0
	III	1,0	4,4	0	2,2	—	—	2,2	0
2	IV	2,0	3,8	0	1,9	—	—	1,9	0
	V	2,0	1,2	0,8	0,6	—	0,2	—	0,5
	VI	2,0	0,8	1,2	0,4	—	0,8	—	2,6
	VII	2,0	0,6	1,4	0,3	—	1,1	—	5,5
	VIII	2,0	0,0	2,0	0	—	2,0	—	10,8
	IX	2,0	0,7	1,3	0,4	—	0,9	—	13,2
	X	1,0	0,6	0,4	0,3	—	0,1	—	13,5
	XI	1,0	0,6	0,4	0,3	—	0,1	—	13,8
	XII	1,0	0,6	0,4	0,3	—	0,1	—	14,1
	I	1,0	0,8	0,2	0,4	0,2	—	—	13,6
	II	1,0	0,9	0,1	0,5	0,4	—	—	12,6
	III	1,0	2,3	0	1,2	1,2	—	—	9,4
3	IV	2,0	2,9	0	1,5	1,5	—	—	5,5
	V	2,0	1,1	0,9	0,6	—	0,3	—	6,3
	VI	2,0	0	2,0	0	—	2,0	—	11,5
	VII	2,0	0	2,0	0	—	2,0	—	16,9
	VIII	2,0	0	2,0	0	—	2,0	—	22,3
	IX	2,0	0	2,0	0	—	2,0	—	27,5
	X	1,0	0	1,0	0	—	1,0	—	30,2
	XI	1,0	0	1,0	0	—	1,0	—	32,8
	XII	1,0	0	1,0	0	—	1,0	—	35,5
	I	1,0	1,0	0	0,5	0,5	—	—	34,2
	II	1,0	0,5	0,5	0,3	—	0,2	—	34,7
	III	1,0	1,7	0	0,9	0,9	—	—	32,4
4	IV	2,0	1,4	0,6	0,7	0,1	—	—	32,1
	V	2,0	25,5	0	12,8	12,8	—	0,8	0
	VI	2,0	9,4	0	4,7	—	—	4,7	0
	VII	2,0	2,2	0	1,1	—	—	1,1	0
	VIII	2,0	0,6	1,4	0,3	—	1,1	—	2,9
	IX	2,0	0,5	1,5	0,3	—	1,2	—	6,0
	X	1,0	1,8	0	0,9	0,9	—	—	3,6
	XI	1,0	1,8	0	0,9	0,5	—	—	1,3
	XII	1,0	3,3	0	1,7	0,5	—	1,2	0

Упрощенный вероятностный метод многолетнего компенсирующего регулирования стока

Рассмотрим типичный случай многолетнего компенсирующего регулирования. Отдача водохранилища осваивается в виде попусков к ниже расположенному водозабору или разделяется на местное водопотребление непосредственно из верхнего и нижнего бьефов и компенсирующее, попусковое водопотребление у нижнего водозабора.

Соотношения между местной и компенсирующей частями водопотребления по вариантам регулирования стока определяются заданием. Например, местное водопотребление может оставаться постоянным с увеличением зарегулированности, а изменения отдачи при этом относятся только к попускам, или наоборот. Могут изменяться и обе части водопотребления.

Введем следующие обозначения:

B — общий объем потребного количества воды у нижнего водозабора за период с дефицитом γ (период орошения, межени или за год в целом), включая транзитные попуски Δ, т. е. $B=\gamma+\Delta$;

α, $A_{бр}$ — относительная и абсолютная годовая отдача брутто водохранилища; $A_{бр}=\alpha\Gamma_0$; $A_п$ — полезная годовая отдача водохранилища;

$\sum q$ — сумма безвозвратных потерь воды из водохранилища за год, $\sum q=A_{бр}-A_п$;

$A_{м.\,п}$, $A_{к.\,п}$ — местная и компенсирующая части полезной отдачи водохранилища, $A_{м.\,п}+A_{к.\,п}=A_п$;

Γ_i, $\Gamma^{(1)}_p$, Γ_0 — средний за период сработки водохранилища (Γ_i), обеспеченный ($\Gamma^{(1)}_p$) и нормальный (Γ_0) годовые объемы притока воды в водохранилище;

$K_{Pм}$, $K_{Pг}$ — модульные коэффициенты обеспеченного притока воды в водохранилище за межень и за год;

t — продолжительность сработки сезонной составляющей емкости V_c в долях года (обычно для водоснабжения $t=10:12=0{,}833$, для орошения $t=5:12=0{,}417$);

m — отношение (в долях единицы) меженного стока за время t к годовому стоку (из осторожности принимается по среднему году, так как в маловодные годы величина m повышена);

$\Gamma^{(1)}_{Pн}$, $\Gamma_{0н}$ — обеспеченный и нормальный годовые объемы незарегулированного стока с нижнего водосбора;

$M^{(1)}_{Pн}$, $M_н$, $M_{и.\,н}$ — обеспеченный, расчетный и используемый объемы незарегулированного стока межени с низового водосбора;

$k=M_{и.\,н}:M_н$ — коэффициент освоения маловодного меженного стока с промежуточного водосбора. Определяется как среднее по 3—4 маловодным гидрографам. При большой разнице между B и $M^{(1)}_{Pн}$ в условиях равнинного промежуточного водосбора значительных размеров можно принять $k=0{,}85\div0{,}95$;

$C_{v\text{м}}$, C_v — коэффициенты вариации объемов стока — меженного и годового (могут быть различными для стоков с верхового и низового участков водосбора);

$C_{s\text{м}}$, C_s — коэффициенты асимметрии кривой распределения объемов меженного и годового стока;

P — обеспеченность отдачи водохранилища, одинаковая для $A_{\text{м. п}}$ и $A_{\text{к. п}}$ (т. е. для однотипных водопотребителей местных и у низового водозабора);

$V_{\text{м}}$, $V_{\text{с}}$ — многолетняя и сезонная составляющие емкости водохранилища;

n, n' — наиболее вероятный и наименьший (в пределах заданной обеспеченности) периоды сработки многолетней составляющей емкости.

Между водохранилищем и нижним водозабором имеется существенный сток, обеспеченный объем которого в пределе за год в целом $\Gamma^{(1)}_{P\text{н}}$, а чаще за межень одного года $M^{(1)}_{P\text{н}}$ или за соответствующую часть ее (например, за период орошения) учитывается при установлении необходимой величины $A_{\text{к. п}}$. Однако учет обеспеченного стока по одному гидрографу соответствует годовому регулированию. Тогда объем воды для компенсации дефицитов ее у нижнего водозабора, например, в течение всей межени (в предположении, что расходы воды весной в году со стоком $\Gamma^{(1)}_{P\text{н}}$ достаточны для покрытия графика водопотребления) определяется по соотношению

$$A_{\text{к. п}} = B - kM^{(1)}_{P\text{н}}. \qquad (77)$$

При многолетнем регулировании с учетом используемого меженного стока по гидрографу одного года занижаются располагаемые ресурсы незарегулированного стока. В результате завышается необходимая полезная отдача водохранилища, а значит, и его емкость. В таких случаях важно то, что любая величина $A_{\text{к. п}}$ есть слагаемая отдачи водохранилища многолетнего регулирования. И это обстоятельство необходимо иметь в виду при учете промежуточного стока, а именно: его объем следует определять не за одну межень, а за несколько, соответственно наименьшему периоду $(n'+t)$ сработки водохранилища на покрытие местной и низовой водопотребности. При этом отдача водохранилища также принимается не за один год, а суммарно за весь период.

Известно, что существующий прием расчета компенсирующего регулирования [26] довольно трудоемок и требует наличия месячных величин стока за длительный ряд лет. Попытаемся упростить и расширить область применения таких расчетов для первых стадий проектирования с использованием имеющихся в гидрологии методов обобщенного определения вероятных объемов стока за год, межень и т. п.

Водохранилище имеет периоды сработки различной длительности (см. § 14). Однако чем длительнее этот период, тем выше суммарный обеспеченный промежуточный сток за несколько меженей,

тем благоприятнее водохозяйственная обстановка у нижнего водозабора при использовании здесь попусковой отдачи из водохранилища с высоким многолетним регулированием стока [80].

Поэтому следует ориентироваться на наименьший период сработки водохранилища при покрытии общей его отдачи брутто $A_{бр}$. Однако и в этом случае выгода от компенсации не по единичному гидрографу, а даже по наименьшему числу их (двум) при многолетнем регулировании позволяет учитывать повышенный промежуточный сток соответственно снижению $C_{vм}$ от $C_{vм}^{(1)}$ до $C_{vм}^{(n'+1)}$.

При наличии местного водопотребления, кроме заданных попусков, наименьшая продолжительность сработки, а значит, и эффект от компенсирующего регулирования увеличиваются. Наименьший период сработки выявляется из воднобалансовых соотношений.

Исходя из водного баланса, годовой приток к водохранилищу в любом периоде обеспеченной его сработки определится по уравнению

$$\Gamma_i = \frac{(n'+t)\,\alpha\Gamma_0 - V_п}{n'+m}. \qquad (78)$$

Сравнивая обеспеченный годовой приток к водохранилищу $\Gamma_P^{(1)}$, среднегодовой приток за период сработки Γ_i по уравнению (78), годовую отдачу брутто $A_{бр}$ и полезную емкость $V_п$, выбираем наименьший период сработки.

Разберем это на примере Печенежского водохранилища (в верховьях р. Северского Донца) с местным и низовым водозаборами для водоснабжения.

Пусть $\Gamma_0 = 715 \cdot 10^6$ м^3, $\Gamma_P^{(1)} = 320 \cdot 10^6$ м^3/год, $\Gamma_{0н} = 756 \cdot 10^6$ м^3/год, $\Gamma_{Pн}^{(1)} = 339 \cdot 10^6$ м^3/год, $M_{Pн}^{(1)} = 107 \cdot 10^6$ м^3, $k = 1{,}0$. Прочие расчетные характеристики для водохранилища и стока с промежуточного водосбора одинаковы: $m = 0{,}35$; $C_v = 0{,}40$, $C_{vм} = 0{,}45$; $C_{sм} = 2C_{vм}$; $C_s = 2C_v$; $P = 95\%$.

Требуется обеспечить $A_{м.п} = 300 \cdot 10^6$ м^3/год и $B = 250 \cdot 10^6$ м^3 за межень (судя по графику водопотребления и гидрографу для года со стоком $\Gamma_{Pн}^{(1)}$, попуски к нижнему водозабору весной, в марте—апреле, не требуются).

Определим необходимую емкость водохранилища и его полезную отдачу $A_п$.

Если попуски $A_{к.п}$ определять по формуле (77), то эта часть общей отдачи была бы равна $A_{к.п} = 250 \cdot 10^6 - 107 \cdot 10^6$ м^3 $= 143 \cdot 10^6$ м^3, и задача решалась бы просто. Хотя фактически $A_{к.п}$ будет меньше этой величины, но имея в виду значительную отдачу $A_{м.п} = 300 \times \times 10^6$ м^3 и потери воды, отмечаем, что при $\Gamma_0 = 715 \cdot 10^6$ м^3/год потребуется высокое регулирование стока.

Задаемся $\alpha = 0{,}75$. При этом $A_{бр} = 0{,}75 \cdot 715 \cdot 10^6 = 536 \cdot 10^6$ м^3/год. Многолетняя составляющая емкости при $\alpha = 0{,}75$ и $P = 95\%$ (см. рис. 38) равна $V_м = 0{,}45 \cdot 715 \cdot 10^6 = 321 \cdot 10^6$ м^3.

Сезонная составляющая[1] по формуле (45) равна $V_с = 265 \times 10^6$ м³, причем $V_п = V_м + V_с = 586 \cdot 10^6$ м³, $V_0 = 626 \cdot 10^6$ м³.

Поскольку расчет по составляющим дает завышенную величину полезной емкости, определим ее методом сложения кривых обеспеченности. Для этого найдем коэффициент вариации стока весны (половодья).

По формуле (48) при $r' = 0$

$$(C_{vг} \cdot 1)^2 = (C_{vм} m)^2 + [C_{vп}(1-m)]^2,$$

откуда, при $C_{vг} = 0{,}40$ и $C_{vм} = 0{,}45$, имеем $C_{vп} = 0{,}57$ ($C_{sп} = 2C_{vп}$).

По указанным выше статистическим характеристикам стока и отдачи брутто путем обычного суммирования кривых обеспеченности по фазам половодья и межени, после 2—3 решений (путем подбора) находим $V_п = 510$ млн. м³.

Годовую полезную отдачу определяем с учетом потерь за год $\sum q$ по среднему действующему объему $V_{ср} = aV_п + V_{м.о}$ или из равенства $A_п = rA_{бр}$ (см. § 14).

Окончательная полезная отдача определяется более точным табличным расчетом. В данном случае $A_п = 396 \cdot 10^6$ м³, в том числе $A_{м.п} = 300 \cdot 10^6$ м³/год и попуск к нижнему водозабору за 10 месяцев межени равен $A_{к.п} = A_п - A_{м.п} = 96 \cdot 10^6$ м³ (табл. 81).

Таблица 81

Гарантированное водопотребление из Печенежского водохранилища на р. Северский Донец ($P = 95\%$), млн. м³

Виды водопотребления	Весна (III—IV)			Межень (V—II)			Год (III—II)		
	Полезное	Потери	Всего	Полезное	Потери	Всего	Полезное	Потери	Всего
Местное из водохранилища (для г. Харькова)	66	24	90	234	116	350	300	140	440
Попуски к г. Изюму (для Донбасса)	—	—	—	96	—	96	96	—	96
Итого из водохранилища	66	24	90	330	116	446	396	140	536

Примечание. Полезное водопотребление $396 \cdot 10^6$ м³ и потери $140 \cdot 10^6$ м³ из отдачи брутто, равной $0{,}75 \cdot 715 = 536 \cdot 10^6$ м³, распределены по сезонам пропорционально числу месяцев.

Проверим достаточность найденной величины $A_{к.п}$.

Поскольку $V_п > A_{бр}$, то наполненное водохранилище не может быть сработано за один год даже при полном отсутствии притока.

[1] В работе [80] емкость $V_с$ определена по частям — для местной отдачи и попусков, что дает излишний запас.

Если же $n'+t=1{,}833$ года, то потребуется суммарная отдача брутто $\sum A_{бр}=1{,}833\cdot 536\cdot 10^6$ м$^3=983\cdot 10^6$ м^3. Водохранилище при этом может быть сработано, но в таком случае приток к нему по зависимости (78) должен составлять

$$\Gamma_i=\frac{1{,}833\cdot 536-586}{1{,}35}\cdot 10^6=294\cdot 10^6 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Очевидно, такой период тоже неприемлем, так как хотя он и возможен, но связан с очень низким стоком Γ_i, который в каждом году 2-летки меньше величины $\Gamma^{(1)}_{P}=320\cdot 10^6$ м^3, не требующей многолетнего регулирования для ее освоения (в пределах заданной обеспеченности P).

Следующий период $n'+t=2{,}833$ (два года плюс межень) с годовым притоком $\Gamma_i=396\cdot 10^6$ м$^3>\Gamma^{(1)}_{P}$ является наименьшим приемлемым периодом сработки полной емкости водохранилища; в данном случае он и должен быть учтен при определении меженного стока на низовом участке. При этом мы вправе располагать на этом участке тремя объемами меженного стока, что позволяет определять объем стока за каждую межень по коэффициенту изменчивости $C^{(3)}_{vм}=C^{(1)}_{vм}:\sqrt{3}$.

Тогда располагаемый обеспеченный незарегулированный меженный сток существенно увеличится. Однако ориентироваться целиком на осредненный за $n'+1$-летие обеспеченный незарегулированный сток межени не следует, имея в виду случайные и независимые колебания объемов стока за каждую межень в пределах $n'+1$-летия (в данном случае за каждую из трех меженей).

Рассмотрим следующий водный баланс (табл. 82) у нижнего водозабора за одну, две и три межени периода сработки верхнего водохранилища на местную и компенсирующую (попусковую) отдачу.

При полном годовом регулировании для попусков из водохранилища выделена часть отдачи, равная $A_{к.п}=43\cdot 10^6$ м^3, причем максимальное покрытие водопотребности в нижнем створе не превышает $150\cdot 10^6$ м^3 за межень.

При многолетнем регулировании стока с наименьшим периодом сработки, равным 1,833 года, осредненный меженный приток составит $147\cdot 10^6$ м^3, а за две межени $294\cdot 10^6$ м^3. Он может быть распределен по двум меженям не поровну. При случайном и независимом колебании объемов меженного стока можно допустить наиболее невыгодное распределение меженных объемов стока в периоде. Это возможно, если на каждую межень, кроме одной, придется обеспеченный объем $M^{(1)}_{Pи}$ (которым мы вправе располагать при составлении водного баланса для нижнего участка), а на последнюю межень — остаток всего обеспеченного за $n'+1$-летие меженного стока. При этом для периода из двух лет (и меженей) в таблице за основу принимается сток не по $147\cdot 10^6$ м^3 в каждую межень, а по $107\cdot 10^6$ м^3 и $187\cdot 10^6$ м^3. Правда, в этом случае

Таблица 82

Определение необходимой отдачи водохранилища $A_{к.\,п}$ за межень

	Число лет в периоде сработки $n' + t$					
	0,833	1,833		2,833		
	порядковый номер межени					
	1	1	2	1	2	3
Гарантируемый объем воды у нижнего водозабора за межень B, 10^6 м^3	150	220	220	250	250	250
Промежуточный обеспеченный приток за межень, 10^6 м^3	107 (107)	107 (147)	187 (147)	107 (165)	107 (165)	281 (165)
Дефицит (добавка из водохранилища), 10^6 м^3	43	113 73	33 (73)	143 (85)	143 (85)	— (85)
Общий за период объем попусков из водохранилища, 10^6 м^3	43	146 (146)			286 (255)	
Компенсирующая полезная отдача водохранилища за межень $A_{к.\,п}$, 10^6 м^3	43	73	73	95,3 (85,0)	95,3 (85,0)	95,3 (85,0)

Примечание. Цифры в скобках соответствуют одинаковому обеспеченному притоку в каждую межень периода сработки, а без скобок — неодинаковому (невыгодному) распределению того же стока.

невыгодное распределение на величину потребных попусков не повлияло, так как промежуточный сток использован полностью (избытков не имеется). Общая за период компенсирующая полезная отдача водохранилища составила $146 \cdot 10^6$ м^3, а $A_{к.\,п} = 73 \cdot 10^6$ м^3/год за межень.

Иная обстановка возникает при дальнейшем повышении регулирования стока, когда наименьший период сработки охватывает уже три межени. При этом обеспеченный объем межени увеличивается до $165 \cdot 10^6$ м^3, а за три межени — до $495 \cdot 10^6$ м^3.

Имея в виду невыгодное распределение общего меженного стока на число меженей, на каждую из первых двух относим обеспеченный сток $M^{(1)}_{Рн}$. На этот сток как на минимум мы вправе ориентироваться каждый год[1]. Тогда на третью межень придется остаток $495 - (107 + 107) = 281$ млн. м^3, который на $31 \cdot 10^6$ м^3 больше уровня гарантируемого водообеспечения. Это — избыток, который не будет использован.

Мыслимы, конечно, случаи еще более невыгодного распределения того же обеспеченного стока на число $n' + 1$ меженей. Например, в отдельные годы n'-

[1] По существу, за 2 года из 3 можно ориентироваться даже на $2M^{(2)}_{Рн}$, т. е. на $(107 + 187) \cdot 10^6$ м^3.

летия возможны объемы менее $M_{Рн}^{(1)}$ при увеличении неиспользованного у водозабора избытка в последнюю межень.

Соответственно этому, отмеченная С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем [61] недостаточная строгость их первого метода расчета водохранилищ (1930 г.), связанная с осреднением обеспеченного годового стока за n-летие, частично относится и к предлагаемому методу.

Однако некоторое отступление от полной строгости расчетов, имеющееся в предполагаемой методике, не может быть существенным, так как:

а) при определении $A_{к.\,п}$ обычно требуется учитывать промежуточный сток не всего года, а только межени;

б) осреднение по возможности устраняется назначением невыгодного распределения стока по числу меженей, принимая за нижний предел $M_{Рн}^{(1)}$, который берется за основу при составлении водного баланса по реке в естественных условиях или для нижнего участка реки с незарегулированным стоком (при обычном, без попусков, регулировании в верховьях);

в) учитывается наименьший приемлемый для заданной обеспеченности период сработки, т. е. два или в редких случаях три года, причем ресурсы меженного стока устанавливаются достаточно осторожно, хотя и с существенным повышением их по сравнению с данными по гидрографу одного года.

В таком случае общая за период отдача водохранилища должна быть равна не $255 \cdot 10^6$ м³ (как было бы при учете одинакового осредненного промежуточного стока в каждом году $n'+1$-летия), а $286 \cdot 10^6$ м³, значит $A_{к.\,п} = 95{,}3 \cdot 10^6 \approx 96 \cdot 10^6$ м³ за межень.

В результате оказалось возможным учесть в качестве располагаемых следующие объемы меженного стока (табл. 83).

Таблица 83

Расчет располагаемого меженного стока с нижнего водосбора

Длительность сработки $n'+t$ (число лет и меженей)	Учтенный нерегулируемый сток межени, 10^6 м³	
	за весь период	в среднем за одну межень
0,883 (одна межень)	107	107
1,833 (две межени)	107 + 187 = 294	294 : 2 = 147
2,833 (три межени)	107 + 107 + 250 = 464	464 : 3 = 154,7

Повышение гарантированного водопотребления у нижнего водозабора за счет использования эффекта компенсации составило

$$\left(\frac{B}{A_{к.\,п} + M_{Рн}^{(1)}} - 1\right) \cdot 100 = \left(\frac{250}{96 + 107} - 1\right) \cdot 100 = 23\%.$$

Отметим, что у нижнего водозабора должен быть подпорный бьеф, обеспечивающий необходимые гидравлические условия для водозабора и обладающий некоторой емкостью для улавливания избыточных приращений незарегулированного меженного стока и для устранения потерь от возможной несогласованности между попусками и этим стоком.

При отсутствии такого бьефа располагаемый меженный сток следует умножать на коэффициент освоения $k<1$ для учета

возможных «проскоков» избытков промежуточного стока межени. (Известно, что отрегулировать попуски в строгом соответствии водопотреблению при переменном стоке на участке и длительном пробеге до водозабора довольно затруднительно.)

Таким образом, расчет компенсирующей части полезной отдачи водохранилища сводится к следующему.

При полном годовом регулировании отдача брутто равна обеспеченному годовому притоку к водохранилищу $Г_{р}^{(1)}$, и полезная водоотдача

$$A_{п}=rA_{бр}=rГ_{р}^{(1)}=A_{м.\,п}+A_{к.\,п}=A_{м.\,п}+B-kM_{Рп}^{(1)}. \qquad (79)$$

При этом величина водообеспечения у нижнего водозабора ограничивается суммой $B=A_{к.\,п}+kM_{Рп}^{(1)}$.

Очевидно, величина $A_{к.\,п}$ может изменяться от нуля, когда водохранилище обеспечивает только местную водоотдачу, до $rГ_{р}^{(1)}$, когда вся полезная отдача является компенсирующей.

В случаях регулирования, которым при наименьшем периоде сработки водохранилища охватываются две межени и более, общая за период компенсирующая полезная отдача, согласно изложенному, должна составлять

$$(n'+1)\,A_{к.\,п}=n'\,(B-kM_{Рп}^{(1)})+$$
$$+\{B-[(n'+1)\,kM_{Рп}^{(n'+1)}-n'\,kM_{Рп}^{(1)}]\}. \qquad (80)$$

Имеющиеся в правой части уравнения (80) величины $n'kM_{Рп}^{(1)}$ с разными знаками погашать нельзя, так как при погодовóм рассмотрении в одну из меженей возможен сброс, причем учтенный меженный сток уменьшается.

Согласно формуле (80), компенсирующая полезная отдача водохранилища за межень должна быть равна

$$A_{к.\,п}=\frac{n'\,(B-kM_{Рп}^{(1)})+\{B-[(n'+1)\,kM_{Рп}^{(n'+1)}-n'kM_{Рп}^{(1)}]\}}{n'+1}. \qquad (81)$$

Если величина в фигурных скобках отрицательная, то это означает, что промежуточный сток используется неполностью: имеется избыток, который не учитывается. Тогда выражение (81) упрощается

$$A_{к.\,п}=\frac{n'}{n'+1}(B-kM_{Рп}^{(1)}). \qquad (82)$$

Для рассмотренного выше примера при регулировании, охватывающем две межени ($n'+1=2$), по зависимости (81) находим $A_{к.\,п}=73\cdot10^{6}$ м^{3}, при трехлетнем регулировании ($n'+1=3$) по зависимости (82) $A_{к.\,п}=95{,}3\cdot10^{6}$ м$^{3}\approx96\cdot10^{6}$ м^{3} (при $k=1$), что, как показано выше, удовлетворяется водохранилищем при $\alpha=0{,}75$.

В уравнениях (81) и (82) используемый промежуточный сток $kM_{\text{н}}$ скрыт. Он определится из соотношения

$$kM_{\text{н}} = \frac{n' kM_{P\text{н}}^{(1)} + \left[(n'+1)\, kM_{P\text{н}}^{(n'+1)} - n' kM_{P\text{н}}^{(1)}\right]}{n'+1}, \qquad (83)$$

если разность в квадратных скобках меньше объема B, и по уравнению

$$kM_{\text{н}} = \frac{n' kM_{P\text{н}}^{(1)} + B}{n'+1}, \qquad (84)$$

если упомянутая разность больше объема B. В таком случае часть этой разности, равная B, используется, а остаток ее проходит мимо.

В результате зависимости (81) и (82) можно переписать в виде

$$A_{\text{к. п}} = B - kM_{\text{н}}. \qquad (85)$$

Согласно изложенному, расчет компенсирующего регулирования при заданной местной годовой полезной отдаче $A_{\text{м. п}}$ и объеме водообеспечения у нижнего водозабора B выполняется подбором в следующем порядке.

1. Задаемся наименьшим приемлемым периодом сработки водохранилища $n'+1$ год.

2. Определяем коэффициент вариации промежуточного меженного стока за $n'+1$-летие $C_{v\text{м}}^{(n'+1)} = C_{v\text{м}}^{(1)} : \sqrt{n'+1}$.

3. С учетом $C_{v\text{м}}^{(n'+1)}$ находим осредненный промежуточный обеспеченный сток за каждую межень периода сработки $M_{P\text{н}}^{(n'+1)}$ и с учетом $C_{v\text{м}}^{(1)}$ — обеспеченный промежуточный сток межени одного года $M_{P\text{н}}^{(1)}$.

4. Устанавливаем коэффициент освоения стока маловодной незарегулированной межени k.

5. По зависимости (83) или (84) находим используемую, осредненную за $n'+1$-летие величину промежуточного меженного стока $kM_{\text{н}}$.

6. Необходимую компенсирующую полезную отдачу $A_{\text{к. п}}$ получаем по зависимости (85).

7. Определяем необходимую суммарную полезную отдачу водохранилища $A_{\text{п}} = A_{\text{м. п}} + A_{\text{к. п}}$ и предварительную величину отдачи брутто $A_{\text{бр}} = A_{\text{п}} : r$, а также $\alpha = A_{\text{бр}} : \Gamma_0$.

8. По величине α и статистическим параметрам стока воды, поступающей в водохранилище, определяются многолетняя и сезонная составляющие емкости.

9. По гидрологическим и водохозяйственным параметрам α, C_v, P, m, t и т. д. определяется наиболее вероятный период $n+1$ год (при расчете потерь табличным способом) и наименьший приемлемый период $n'+1$ год сработки водохранилища. При не очень высоком коэффициенте регулирования оба периода равны.

10. Если полученный период $n'+1$ год отличается от предварительно принятого, производится уточнение всего расчета и общей емкости водохранилища.

11. По осредненному объему водохранилища $V_{ср}=aV_{п}+V_{м.о}$ и соответствующей ему площади зеркала $F_{ср}$ (или табличным способом для всего $n+1$-летия) определяются годовые потери (на испарение и безвозвратную фильтрацию) и годовая полезная отдача водохранилища. Последняя должна быть равна $A_{п}=A_{м.п}+A_{к.п}$. При существенном отклонении от этой суммы уточняются наименьший приемлемый период сработки $n'+1$, незарегулированный сток межени $kM_{н}$, полезная отдача $A_{к.п}$ и $A_{п}$, отдача брутто $A_{бр}$, α и полезная емкость водохранилища.

Напомним, что утечки и часть фильтрации, поступающие в нижний бьеф, не являются бесполезными, так как могут учитываться вместе с попусками в покрытии водопотребления у нижнего водозабора.

Если задана полезная емкость водохранилища $V_{п}$ с полезной отдачей больше местного водопотребления $A_{м.п}$, все прочие расчеты выполняются проще. Поэтому удобнее задаваться полезной емкостью водохранилища с последующим подбором величины α и соответствующих ей $V_{м}$ и $V_{с}$. Зная α, находим $A_{бр}$, $A_{п}$, $A_{к.п}$ и $n'+1$, а затем определяем $kM_{п}$ и $B=A_{к.п}+kM_{н}$. Проделав такие расчеты для нескольких полезных объемов, можно построить зависимости полезных водоотъемов у нижнего и местного водозаборов, которые принимаются за основу для технико-экономического обоснования варианта регулирования и использования речного стока по намечаемой схеме.

Метод компенсирующего регулирования на основе сложения кривых обеспеченности стока и наполнений водохранилища

Вероятностные методы расчетов регулирования речного стока, используемые даже при наличии результатов расчета по многолетним данным о стоке (например, для контроля обеспеченности водопотребления), становятся неизбежными при ограниченности стоковых данных. В последнем случае вероятностные расчеты, основанные на методе балансовых разностей [26, 75], неприменимы.

Рассмотренный выше метод [80] не вызывает трудностей при его использовании, но дает упрощенное, хотя и достаточно осторожное решение. Поскольку этот метод не вполне строг, при ответственных расчетах он должен быть заменен более совершенным.

Изложенный выше учет вероятностных комбинаций промежуточного стока в сочетании с режимом работы водохранилища вплотную подходит к приему сложения кривых обеспеченности стока и наполнений водохранилища. Суммирование этих кривых производится с исключением отдачи водохранилища. Его отдача изменяется даже при постоянном водопотреблении и местном и низовом. Непостоянство отдачи вызывается изменчивостью ее попуско-

вой составляющей, тесно связанной с колебаниями промежуточного стока. При этом у низового водозабора должно соблюдаться покрытие заданного водопотребления прежде всего за счет этого стока.

Таким образом, кривые обеспеченности наполнений должны суммироваться с кривыми обеспеченности: а) регулируемого стока с исключением постоянной (местной) составляющей отдачи и б) нерегулируемого стока с исключением переменной (попусковой) составляющей. Такое групповое суммирование кривых обеспеченности при сложных условиях водоотдачи (на два режима) производится, насколько известно, впервые.

Рассмотрим общий состав операций по суммированию трех кривых обеспеченностей (или некоторого частного наполнения в начале какой-нибудь фазы стока с двумя кривыми обеспеченности стока), которые пришлось бы выполнять при обычном решении такой задачи.

а. Частное начальное наполнение, изображаемое горизонтальной ступенью, суммируется с кривой обеспеченности регулируемого стока.

б. Из полученной суммы исключается постоянная местная отдача брутто путем горизонтальной срезки ее в нижней части полученной фигуры — суммы (см. рис. 43 *в*). Результатом этой операции всегда оказывается криволинейная фигура с горизонтальным основанием.

в. Эту криволинейную фигуру надо представлять уже в виде нескольких новых горизонтальных площадок — ступеней (все для того же одного частного наполнения) и суммировать с кривой обеспеченности промежуточного стока.

г. Из каждой новой полученной суммы — криволинейной фигуры с горизонтальным основанием — исключается компенсирующая часть отдачи, которая является переменной в связи с обратной зависимостью объема компенсации от объема промежуточного стока. В результате этого каждая из новых фигур оказывается криволинейной и в основании.

д. Требуется все упомянутые новые остаточные фигуры привести к горизонтальному основанию.

е. Фигуры, приведенные к горизонтальному основанию, суммируются, в результате чего получается частная кривая обеспеченности наполнений к концу фазы стока для одного начального наполнения.

Рассмотренный фрагмент получения только одной частной кривой обеспеченности наполнений показывает, что выполнить обычным путем групповое суммирование кривых обеспеченности при двух режимах отдачи практически почти невозможно. Поэтому процесс упомянутого суммирования трех кривых обеспеченности представляет самостоятельную задачу.

Требуется решить ее таким образом, чтобы избавиться от многочисленных промежуточных построений и громоздких поисков.

Эта цель достигается следующим образом. Предварительно, путем сложения кривых обеспеченности по фазам стока, определяется

полезная емкость обычного некомпенсирующего водохранилища, необходимая для покрытия (с принятой обеспеченностью $P\%$) заданной отдачи брутто или суммарной (местной и попусковой) полезной отдачи с учетом некоторой доли потерь для перехода к отдаче брутто и к коэффициенту регулирования. При этом используются параметры стока: посезонные нормы стока, коэффициенты вариации и другие, установленные по ограниченным гидрометрическим данным или различными гидрологическими приемами (изолинии, удлинение стоковых рядов за год в целом или по сезонам половодья и межени и т. п.).

Для полученной емкости стабильная кривая обеспеченности наполнений к концу весны заменяется ступенчатым графиком. Все операции для ступени полного водохранилища показаны на рис. 103.

Над верхней границей первой ступени (затем следующей и т. д.), как над осью абсцисс $P\%$ (0—100%), строится кривая обеспеченности притока ДЕС в водохранилище за межень.

Для общего случая можно допустить, что регулируемый и промежуточный объемы стока не имеют функциональной связи. В таком случае между меженными объемами стока (регулируемым и промежуточным) предполагается графическая или корреляционная зависимость. (Коэффициент корреляции и уравнение регрессии между упомянутыми объемами стока [см. формулу (49)] должны быть установлены по фактическим данным о стоке в створе водохранилищной плотины и в створе низового водозабора.) Это обстоятельство расширяет универсальность предлагаемого метода.

С построенной кривой обеспеченности регулируемого стока равномерно по длине кривой снимается несколько точек — величин — и для них по уравнению регрессии (или графику связи) находятся соответствующие величины промежуточного стока, по которым строится кривая обеспеченности ABC. Однако ординаты этой кривой откладываются не от принятой оси абсцисс, а от исходных точек кривой обеспеченности регулируемого стока $W_{рег}$, поверх которой таким образом надстраивается кривая обеспеченности промежуточного стока $W_{пр}$[1].

Затем исключим водопотребление, которое также будем откладывать не от оси абсцисс, как обычно, а от первой кривой DEC. Для этого сместим ее параллельно самой себе вниз на величину, равную в масштабе объему местного водопотребления брутто за межень и вверх на величину полезного водопотребления B у низового водозабора. Смещение вниз дает кривую $D'E'C'$. В пределах обеспеченностей без попусков $O'N$ эта кривая будет представлять полное водопотребление из водохранилища за межень (для данной ступени). Смещение вверх образует кривую $A'B$. Ордината BE равна в масштабе значению B.

---

[1] В случае функциональной связи между $W_{рег}$ и $W_{пр}$ (или при допущении ее, считая $r''=1{,}0$) построение кривой обеспеченности промежуточного стока равноценно аналогичному построению кривой для всего стока ($W_{рег}+W_{пр}$) до водозабора, но с отложением ординат от частной оси абсцисс.

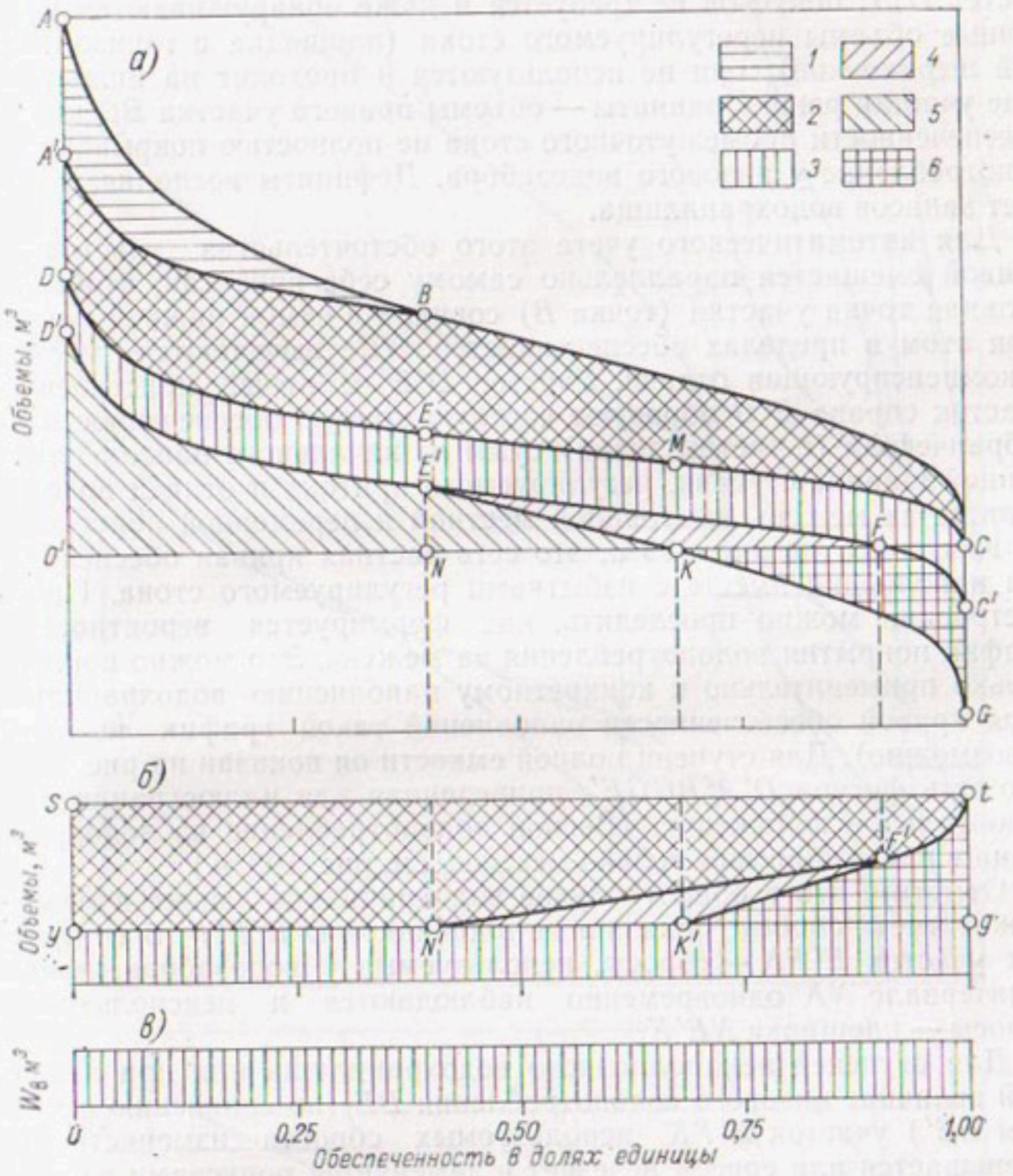


Рис. 103. *а*) Построение условной кривой обеспеченности наполнений водохранилища к концу межени для интервала полной емкости в начале межени.

1, *2* — промежуточный сток за межень: избыточный (*1*) и используемый (*2*); *3* — местное водопотребление; *4* — используемые сбросы через водослив; *5* — неиспользуемые сбросы; *6* — попуски из водохранилища; *0O'C1* — ступень полной емкости в начале межени; *DEMC* — кривая обеспеченности притока в водохранилище за межень; *ABC* — кривая обеспеченности промежуточного стока (ординаты отложены не от оси *O'C*, а от кривой *DEMC*); *D'E'KG* — кривая обеспеченности алгебраических сумм емкости, притока в водохранилище и водопотребления из него за межень; *O'KG* — кривая обеспеченности наполнений к концу межени.

б) График водопотребления за межень: *0yg1* — местное водопотребление из водохранилища; *ystg* — водопотребление у водозабора.

в) График водопотребления за весну.

Выше кривой $A'B$, слева от точки B, т. е. в пределах обеспеченностей $O'N$, попусков не требуется и даже обнаруживаются избыточные объемы нерегулируемого стока (площадка с горизонтальной штриховкой); они не используются и проходят на нижележащие участки реки. Ординаты — объемы правого участка BC кривой обеспеченности промежуточного стока не полностью покрывают водопотребление у низового водозабора. Дефициты восполняются за счет запасов водохранилища.

Для автоматического учета этого обстоятельства участок BC кривой смещается параллельно самому себе вниз так, чтобы начальная точка участка (точка B) совпала с самой нижней кривой. При этом в пределах обеспеченностей NC вычитаются местная и компенсирующая отдачи. Участок $D'E'$ и новый пристроенный участок справа $E'G$ образуют частную кривую обеспеченности алгебраических (с учетом знака) сумм из начального наполнения на данной ширине ступени, регулируемого притока и отдачи водохранилища за межень, постоянной местной и переменной попусковой.

Как видно на рис. 103 *а*, это есть частная кривая обеспеченности наполнений вместе с избытками регулируемого стока. При ее построении можно проследить, как формируется вероятностный график покрытия водопотребления за межень. Это можно показать только применительно к конкретному наполнению водохранилища (для кривой обеспеченности наполнений такой график выделить невозможно). Для ступени полной емкости он показан на рис. 103 *б*. Это есть фигура $D'A'BCGE'$, приведенная для иллюстрации в горизонтальное положение. (Весной водопотребление из водохранилища в нашем примере только местное, см. рис. 103 *в*.)

Отметим, что в общем случае водохранилище даже в межень может иметь сбросы, показанные площадкой $O'D'E'F$. В ее пределах участок $E'FK$ — сбросы, используемые у водозабора, причем в интервале NK одновременно наблюдаются и неиспользуемые сбросы — площадка $NE'K$.

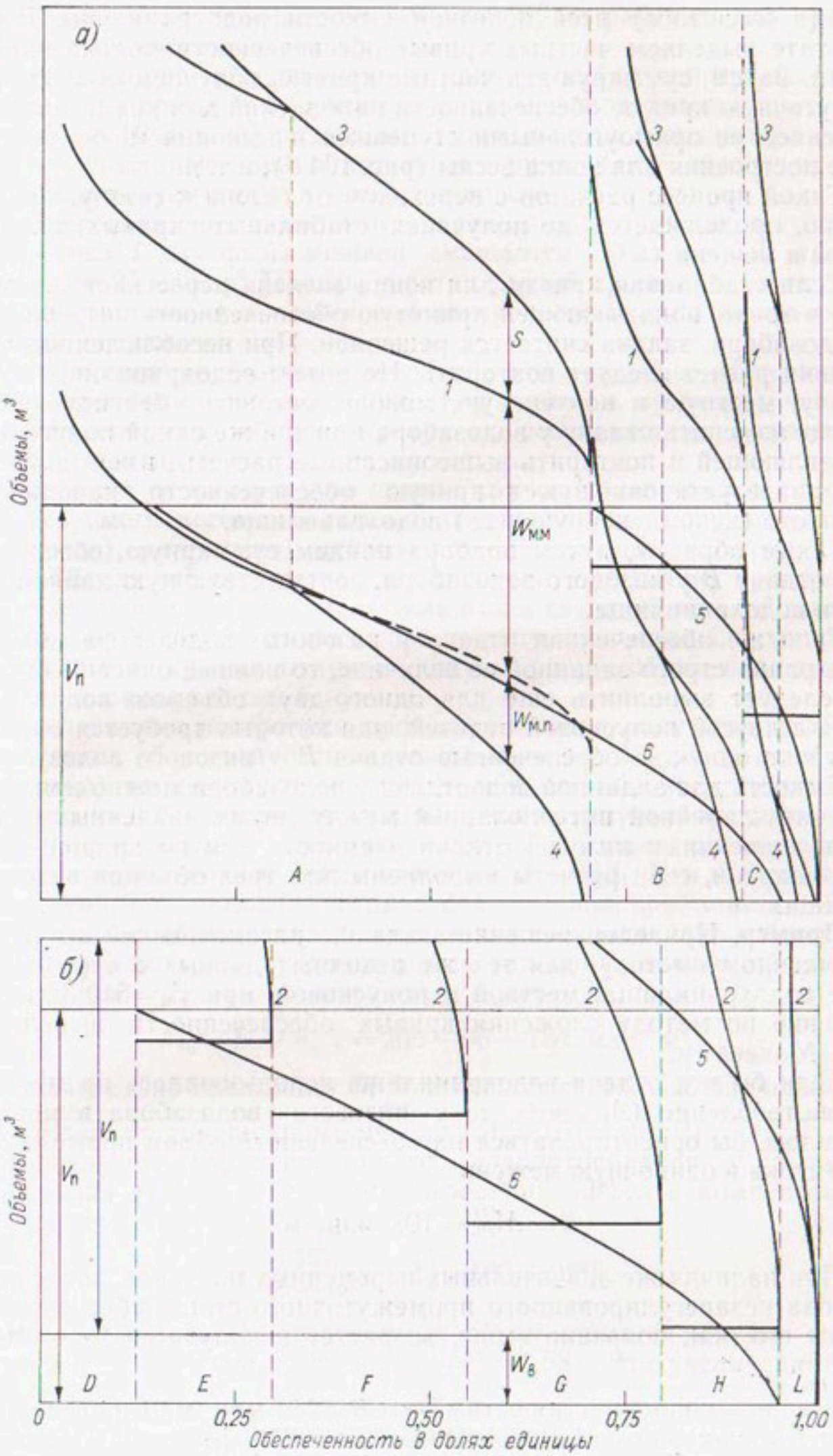
Для ступеней ненаполненного водохранилища или при небольшой величине низового водопотребления BE (по сравнению с местным EE') участок $E'FK$ используемых сбросов изменяется. Он уменьшается или совсем исчезает и заменяется попусками из водохранилища. Точно так же изменяются неиспользуемые сбросы.

Построив частные кривые, аналогичные кривой $D'E'G$, для всех ступеней — наполнений водохранилища (рис. 104 *а*), — проводим линию, параллельную общей оси абсцисс на расстоянии от нее, рав-

---

Рис. 104. Построение безусловных кривых обеспеченности наполнений водохранилища.

а — к концу межени; *б* — к концу весны; *1* — кривые обеспеченности притока в водохранилище за межень; *2* — то же за весну; *3* — кривые обеспеченности промежуточного стока за межень; *4* — кривые обеспеченности алгебраических сумм емкости, притока в водохранилище и водопотребления из него за межень; *5* — стабильная кривая обеспеченности наполнений к концу весны; *6* — то же к концу межени; *A*, *B*, *C* — интервалы (ступени) наполнений водохранилища к началу межени; *D*, *E*, *F*, *G*, *H*, *L* — то же к началу весны; $W_в$ — отдача водохранилища за весну; $W_{м.м}$ — местное водопотребление за межень; $W_{м.п}$ — попуски из водохранилища за межень; *S* — используемый промежуточный сток за межень.


а)
б)
Объемы, м³
Обеспеченность в долях единицы
S
$W_{м.м}$
$W_{м.п}$
$V_п$
$W_в$
A
B
C
D
E
F
G
H
L
0
0,25
0,50
0,75
1,00

ном (в масштабе) всей полезной емкости водохранилища. В результате выделяем частные кривые обеспеченности только наполнений. Затем, суммируя эти частные кривые, получаем общую промежуточную кривую обеспеченности наполнений для конца межени. Заменяем ее прямоугольными ступенями и выполняем более простые построения для конца весны (рис. 104 *б*), и т. д.

Такой процесс расчетов с переходом от сезона к сезону, как известно, продолжается до получения стабильных кривых в конце весны и межени.

Если стабильная кривая для конца межени пересекает ось абсцисс в точке, показывающей принятую обеспеченность потребления у водозабора, задача считается решенной. При несоблюдении этого условия расчет следует повторить. Но объем водохранилища и его отдачу, местную и попусковую, можно оставить без изменения. Проще изменить отдачу у водозабора при той же самой попусковой составляющей и повторить вышеописанные расчеты, имея полученную ранее установившуюся кривую обеспеченности наполнений обычного (некомпенсирующего) водохранилища.

Таким образом, путем подбора найдем суммарную обеспеченную отдачу B у низового водозабора, соответствующую данной емкости водохранилища.

Если же обеспеченная отдача у низового водозабора должна быть равна строго заданной ее величине, то полный описанный расчет следует выполнить еще для одного-двух объемов водохранилища с другой попусковой отдачей, для которых требуется определить еще одну-две обеспеченные отдачи B у низового водозабора.

Емкость для заданной водоотдачи у водозабора можно при этом получить линейной интерполяцией между двумя найденными парными значениями низовой отдачи и емкости или по кривой связи этих величин, если расчеты выполнены для трех объемов водохранилища.

Пример. Приведем решение задачи, рассмотренной выше по упрощенному методу, для тех же исходных данных о стоке и отдаче водохранилища, местной и попусковой, при $V_{\text{п}}=510$ млн. м^3. Решение по методу сложения кривых обеспеченности выполнено Г. К. Макеевым.

Если бы вся отдача водохранилища использовалась на местное водопотребление ($A_{\text{к. п}}=0$), то у низового водозабора в межень пришлось бы ориентироваться на обеспеченный объем промежуточного стока в одиночную межень

$$B=M^{(1)}_{P_{\text{п}}}=107 \text{ млн. м}^3.$$

При наличии же значительных переменных попусков, зависящих от хода незарегулированного промежуточного стока, обеспеченный объем его, как показано выше, возрастет и получится, что $M_{\text{п}}>M^{(1)}_{P_{\text{п}}}$.

В порядке подбора допустим, что $B=260$ млн. м^3 (приведем результаты, как раз соответствующие искомому решению). Посмот-

рим, с какой обеспеченностью при этом будет работать вся водохозяйственная система.

Согласно рис. 104, стабильную кривую обеспеченности наполнений к концу весны 5, полученную ранее для водохранилища с объемом $V_п = 510$ млн. м³, разобьем на ступени и по каждой из них выполним описанные здесь построения кривых *1* и *3* обеспеченности стока регулируемого *1* и промежуточного *3*.

Нанесенная над ступенями кривая обеспеченности регулируемого стока *1* для фазы межени смещается вниз на 350 млн. м³ и вверх на 96 млн. м³. Правые участки кривой промежуточного стока смещаются вниз, в положение *4* за пределами уже исключенной местной отдачи.

На расстоянии, равном в масштабе 510 млн. м³ от общего основания, проводим параллельную ему линию и, суммируя частные кривые, получим общую кривую обеспеченности наполнений к концу межени *6*.

Разбивая ее на ступени и нанося кривую обеспеченности только регулируемого весеннего стока *2* (поскольку за весну попуски не требуются), учтем лишь местное весеннее водопотребление брутто $A_{м.в} = 90$ млн. м³, отсчитывая эту постоянную величину непосредственно от общей оси абсцисс. Откладывая сверх 90 млн. м³ емкость 510 млн. м³ и проводя линию, параллельную основанию, суммированием частных кривых получим общую кривую обеспеченности наполнений к концу весны *5*.

Аналогичные построения продолжаются до получения стабильных кривых обеспеченности за межень и весну. Меньшая из обеспеченностей, соответствующих пересечению оси абсцисс стабильными кривыми за весну и межень, принимается за результирующую.

В нашем примере меньшую величину $P\%$ дает кривая обеспеченности наполнений к концу межени — $P = 95\%$. Эта цифра, как и обеспеченность общей отдачи самого водохранилища $A_{бр} = 536$ млн. м³ (без разделения ее на две составляющие и без учета нерегулируемого стока), точно равна заданной. Значит, обеспеченным объемом нерегулируемого стока будет

$$M_н = B - A_{к.п} = 260 - 96 = 164 \text{ млн. м}^3,$$

что значительно превышает $M^{(1)}_{Pн}$ и несколько больше значения $M_н$, найденного по упрощенному методу ($M_н = 154$ млн. м³).

Повышение гарантированного водопотребления у низового водозабора только за счет использования эффекта компенсанции составляет

$$\left(\frac{260}{96 + 107} - 1\right) \cdot 100 = 28\%,$$

а располагаемый гарантированный объем стока за межень увеличился в 1,53 раза ($M_н : M^{(1)}_{Pн} = 164 : 107 = 1{,}53$). Это увеличение произошло при величине попусковой отдачи, составляющей лишь $96 : 268 = 0{,}36$, или 36% нормы меженного стока ($M_{0н} = mГ_{0н}$)

с промежуточного водосбора, к которой стремится значение $M_н$ с увеличением зарегулированности и соотношения $A_{к.п} : M_{0н}$.

Таким образом, при высоком коэффициенте регулирования стока, т. е. при наиболее вероятной сработке водохранилища в течение 3—4 лет, сравнительно небольшие значения $A_{к.п}$ дают значительное (до 1,5—2-кратного) увеличение гарантированного у водозабора промежуточного стока межени, что зависит от соотношения объема попусков и нормы промежуточного меженного стока, а также от его коэффициента изменчивости.

§ 37. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА КАСКАДОМ ИЛИ СИСТЕМОЙ ВОДОХРАНИЛИЩ С НЕЗАВИСИМОЙ ВОДООТДАЧЕЙ

Расчеты каскадного независимого регулирования по календарным рядам стока

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

Интегральные кривые должны характеризовать общий сток со всего выше лежащего водосбора до створа каждой плотины. Расчеты начинаются с самого верхнего водохранилища и последовательно распространяются на ниже лежащие установки в порядке их расположения по течению реки. Покажем это на примере, заимствованном из работы В. А. Бахтиарова [12]. Пусть в каскаде из трех водохранилищ общий сток в створах а, б, в составляет соответственно 37, 69 и 100%, а полезные объемы водохранилищ равны 0,50; 0,44 и 0,36 км³ и позволяют выполнить сезонное регулирование стока. Рассмотрим это применительно к регулированию на постоянный расход в расчетном маловодном году (рис. 105).

По маловодной части года в створе а по заданной емкости определяется зарегулированный расход (рис. 105 *а*, линия *cd*). Затем по этому расходу ведется наполнение в многоводный сезон (линия *ok*). Далее, линия зарегулированных расходов проводится при наполненной емкости параллельно кривой естественного стока, соблюдая работу установки на приточных расходах до точки *c*. Здесь начинается сработка, а в точке *d* она заканчивается. Линия *okcd* есть интегральная кривая зарегулированных расходов в створе плотины верхнего водохранилища.

Переходя к среднему водоему (б), учтем влияние на него верхней установки. Оно состоит в том, что в известный отрезок времени часть стока удерживается и не поступает к следующей ступени. Поэтому, уменьшая ординаты кривой естественного стока среднего водохранилища на объемы воды, содержащиеся в верхнем водоеме, получаем интегральную кривую притока на среднюю ступень (линия $V_а$ на рис. 105 *б*). Расчет регулирования средним водохрани-

лищем производится по исправленной интегральной кривой при емкости 0,44 км³ и аналогичен предыдущему. Переходя к нижнему водохранилищу (в), учтем влияние на него двух верхних ступеней. Для этого необходимо уменьшить ординаты кривой естественного притока к нижней установке на объемы воды, содержащейся в обоих верхних водохранилищах, и по исправленной интегральной кривой (линия $V_а+V_б$) провести линии регулирования третьим водохранилищем при его емкости 0,36 км³, затем четвертым и т. д. (105 *в*).

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

При больших расстояниях между створами каскада следует учитывать сдвиг стока по отдельным ступеням соответственно времени добегания. При этом за основу берут какой-то один створ, а в других створах границы сроков расчетных интервалов времени (декад, месяцев) сдвигаются. Так, если в трехступенном каскаде за основу взят нижний створ, а время добегания между створами а и б равно 3 дням, между створами б и в — 5 дням, то при расчетах по среднедекадным расходам декады надо брать в створе в с 21 по 30-е, в створе б с 16 по 25-е и в створе а с 13 по 22-е число месяца.

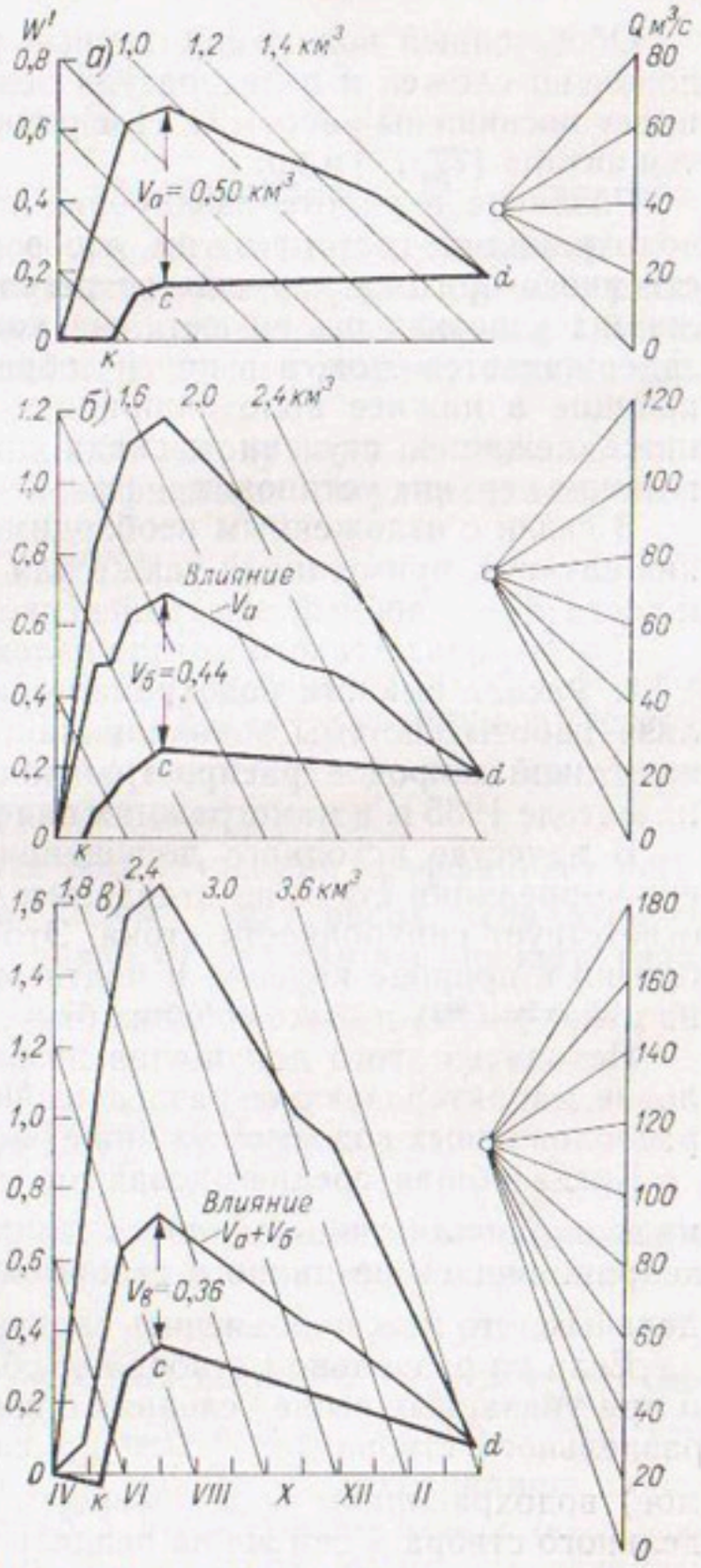


Рис. 105. Схема расчета каскадного независимого регулирования при трех водохранилищах.

Вероятностный расчет системы водохранилищ с независимой водоотдачей

Обобщенный водохозяйственный расчет системы водохранилищ довольно сложен и в литературе освещен недостаточно. Этому вопросу посвящены работы С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [60], статьи автора [77, 79] и др.

Различие в работе изолированных и каскадно расположенных водохранилищ состоит в том, что в последнем случае режим естественного притока нарушается регулированием стока на выше лежащих участках речной сети, на которых в одни годы полностью задерживается сток, а в другие образуются излишки стока, поступающие в нижнее водохранилище. Поэтому при расчете каждой ниже лежащей ступени каскада должно учитываться указанное влияние верхних установок.

В связи с изложенным необходимо найти метод расчета для таких случаев, применимый также для малоисследованных бассейнов и достаточно удобный для технического использования.

Два варианта такого метода изложены ниже.

I. Расчет емкости водохранилища в каскаде. В результате анализа работы системы водохранилищ автором в 1941 г. предложен нашедший широкое распространение прием расчета, основанный на методе 1935 г. и номограммах для него [77].

В качестве исходного допущения принимается, что коэффициент корреляции стока по отдельным частям бассейна $r''=1$, что соответствует синхронности стока. Это допущение обычно довольно близко к природе явления и подтверждается данными наблюдений на реках малых и даже средних бассейнов.

Исходя из этого допущения возникает следующее (первое) условие, характеризующее раздельный створ (в смысле влияния выше расположенных водоемов на ниже расположенные).

Когда общая среднегодовая за многолетие отдача воды $\alpha^{н}_{общ}$ из водохранилищ ниже данного створа меньше общей отдачи из водохранилищ выше данного створа $\alpha^{в}_{общ}$, то этот створ будет раздельным, что можно объяснить следующим образом.

Если на раздельном створе нет сбросов, то в эти годы при $r''=1$ и при указанных выше условиях о соотношении отдач выше и ниже раздельного створа ($\alpha^{в}_{общ} > \alpha^{н}_{общ}$) самое нижнее (рассматриваемое) водохранилище будет зависеть только от водоемов ниже раздельного створа. Если же на раздельном створе образуются сбросы, то по тем же условиям на нижнем водохранилище также будут сбросы. Следовательно, последнее в расчетном случае зависит только от водоемов ниже раздельного створа, с которыми и должно рассматриваться совместно.

Таким образом, возникает необходимость нахождения раздельного створа исходя из определения суммарной отдачи, что удобнее всего можно решить при помощи общих коэффициентов регулирования (верхнего $\alpha^{в}_{общ}$ и нижнего $\alpha^{н}_{общ}$) в следующем порядке.

Каждое из водохранилищ расчетной схемы характеризуется собственным коэффициентом регулирования

$$\alpha_c = \frac{A^i_{бр}}{\Gamma^i_{0c}},$$

где $A^i_{бр}$ — отдача брутто данного водохранилища; Γ^i_{0c} — среднегодовой сток с собственного водосбора того же водохранилища.

Практически для изолированного водоема $\alpha_c < 1{,}0$, для работающего же в системе α_c может быть значительно больше 1,0, так как он определяется по отношению к среднегодовому стоку с собственного водосбора.

Далее, для каждого створа ходом сверху вниз по течению реки определяется общий верхний коэффициент регулирования стока

$$\alpha^{в}_{общ} = \frac{\sum_1 A_{бр}}{\sum_1 \Gamma_{0c}},$$

где $\sum_1 A_{бр}$ — суммарная отдача водохранилищ до створа, для которого определяется величина $\alpha^{в}_{общ}$; $\sum_1 \Gamma_{0c}$ — суммарный естественный среднегодовой сток с частных водосборов до того же створа.

Для изолированного водохранилища $\alpha^{в}_{общ} = \alpha_c$.

Таким же образом находится общий нижний коэффициент регулирования $\alpha^{н}_{общ}$, получаемый ходом снизу вверх. Для второго (предпоследнего) створа $\alpha^{н}_{общ}$ равно отдаче самого нижнего (рассматриваемого) водохранилища $\alpha^{н}_{общ} = \alpha^{н}_{c}$. Для третьего створа

$$\alpha^{н}_{общ} = \frac{A^{н}_{бр} + A^{''}_{бр}}{\Gamma^{н}_{0c} + \Gamma^{''}_{0c}} \text{ и т. д.}$$

Ходом снизу вверх последовательно находим коэффициенты $\alpha^{н}_{общ}$, приключая одно водохранилище к другому, так же как это делается при определении $\alpha^{н}_{общ}$.

Таким образом, находим створ, для которого $\alpha^{в}_{общ} > \alpha^{н}_{общ}$. Однако по соотношению $\alpha^{в}_{общ}$ и $\alpha^{н}_{общ}$ еще нельзя сказать о том, что данный створ является раздельным, так как водохранилище, образуемое плотиной непосредственно в этом створе, может обеспечивать весьма небольшую отдачу и из него могут происходить сбросы [1], хотя общий верхний коэффициент регулирования $\alpha^{в}_{общ}$ в этом створе за счет других водохранилищ выше этого створа будет больше общего нижнего коэффициента регулирования $\alpha^{в}_{общ} > \alpha^{н}_{общ}$.

---

[1] Асинхронно (по годам) относительно к сбросам из нижнего (рассматриваемого) водохранилища.

Следовательно, для определения раздельного створа необходимо соблюдать не только вышеуказанное неравенство между общими коэффициентами регулирования, но также требуется наличие второго условия для этого створа, т. е. $\alpha_c > \alpha^{н}_{общ}$. Только в таком случае все водохранилища, расположенные выше этого створа, будут иметь синхронные сбросы с нижним и потому не будут оказывать влияния на расчетные условия последнего.

Таким образом, ближайший к рассматриваемому водохранилищу створ, удовлетворяющий одновременно неравенствам $\alpha^{в}_{общ} > \alpha^{н}_{общ}$ и $\alpha_c > \alpha^{п}_{общ}$, будет являться раздельным при учете количества водохранилищ, которые должны входить в расчет низового водохранилища.

Все ниже лежащие водохранилища, для которых не выдерживается соблюдение двух вышеуказанных неравенств, включаются в расчет совместно с рассматриваемым, все выше лежащие водохранилища отбрасываются.

Ясно, что расчет водохранилищ производится последовательно по ходу сверху вниз, а определение входящих в расчет водохранилищ — по ходу снизу вверх.

В случае системы водохранилищ, расположенных по нескольким ветвям, отбор водохранилищ, включаемых в расчет по вышеприведенному критерию, производится в той же последовательности, определяя положение раздельного створа в каждой ветви. При этом, очевидно, может быть несколько раздельных створов.

С увеличением $\alpha^{н}_{с}$ раздельные створы оттесняются вверх и при некотором коэффициенте $\alpha^{п}_{с}$ они совершенно вытесняются из всей системы, и тогда все водохранилища включаются в расчет рассматриваемого.

После определения раздельного створа для данного $\alpha^{н}_{с}$ необходимый объем рассматриваемого водохранилища находится следующим образом.

Для всех водохранилищ, включаемых в расчет (вместе с рассматриваемым), по величине коэффициента регулирования $\alpha^{н}_{общ}$ находится суммарный полезный объем, соответствующий суммарной отдаче ниже раздельного створа

$$\alpha^{п}_{общ} = \frac{\sum_2 A_{бр}}{\sum_2 Г_{0с}},$$

где $\sum_2 A_{бр} = A^{н}_{бр} + A''_{бр} + A'''_{бр} + \ldots + A^{(n)}_{бр}$ — суммарная отдача всех водохранилищ, расположенных ниже раздельного створа; $\sum_2 Г_{0с} = Г^{н}_{0с} + Г''_{0с} + Г'''_{0с} + \ldots + Г^{(n)}_{0с}$ — суммарный среднегодовой сток со всех собственных (частных) водосборов ниже раздельного створа; $A^{н}_{бр} = \alpha^{н}_{с} Г^{н}_{0с}$ — зарегулированная отдача, на которую проектируется рассматриваемое водохранилище; $A''_{бр}$, $A'''_{бр}$, ..., $A^{(n)}_{бр}$ — зарегулированные отдачи водохранилищ, включаемых в расчет;

$W^{н}_{0с}$ — собственный среднегодовой сток рассматриваемого (низового) водохранилища; $W''_{0с}$, $W'''_{0с}$, ..., $W^{(n)}_{0с}$ — среднегодовые собственные объемы стока по каждому из водохранилищ, включаемых в расчет. При этом коэффициент вариации годовых объемов стока принимается постоянным, одинаковым для всех водохранилищ рассматриваемой системы, что обычно достаточно близко к действительности в пределах довольно значительных водосборных бассейнов.

При ощутимой разнице между коэффициентами вариации стока для отдельных водохранилищ и при желании более точно произвести расчет определяется средневзвешенное значение C_v по формуле

$$C_v = \frac{C^{н}_v W^{н}_{0с} + C''_v W''_{0с} + C'''_v W'''_{0с} + \ldots + C^{(n)}_v W^{(n)}_{0с}}{\sum_2 W_{0с}},$$

где $C^{н}_v$, C''_v, C'''_v, ..., $C^{(n)}_v$ — коэффициенты вариации, принятые в расчетах индивидуально по каждому из водохранилищ ниже раздельного створа.

По найденным $\alpha^{н}_{общ}$ и C_v, пользуясь, например, номограммами автора для многолетней составляющей емкости изолированных водохранилищ, определяются суммарные величины $\beta_м$ и $V_м$ по формуле

$$V_м = \beta_м \sum_2 W_{0с}.$$

Многолетняя емкость рассматриваемого (низового) водохранилища при этом будет равна

$$V^{н}_м = V_м - V''_м - V'''_м - \ldots - V^{(n)}_м,$$

где $V'''_м$, $V''''_м$, ..., $V^{(n)}_м$ — многолетние емкости остальных водохранилищ ниже раздельного створа.

Таким образом, путем нахождения соответствующего коэффициента регулирования $\alpha^{н}_{общ}$ расчет системы водохранилищ удалось привести к расчету одного изолированного водохранилища, что позволяет при расчетах системы воспользоваться существующими номограммами (см. рис. 38) для изолированных водохранилищ. Чтобы определить весь полезный объем водохранилища, остается только добавить сезонную составляющую емкости для регулирования стока в году, следующем после исчерпания многолетней емкости.

Сток этого дополнительного года соответственно положениям, изложенным в § 12, принимается равным

$$K = \alpha^{н}_{общ} \text{ при } \alpha^{н}_{общ} > K_{Pг}$$

или

$$K = K_{Pг} \text{ при } \alpha^{н}_{общ} < K_{Pг}.$$

(Вместо $K_{Рт}$ имеется в виду меженный сток $K_{Рм}$, если коэффициенты вариации стока за год и за межень существенно отличаются.)

Как отмечено в § 12 и в работе [78], некоторая ошибка в меженном притоке при определении сезонной емкости для случаев значительного многолетнего регулирования слабо отражается на результатах расчета. Для водохранилища с многолетним регулированием, работающего в системе, эта возможная ошибка менее чувствительна, так как влияющий на сезонную составляющую емкости меженный приток учитывается только с собственного водосбора. При этом формула для сезонной составляющей $V^{н}_{с}$ имеет следующий вид [при $\alpha^{н}_{общ} > K_{Рт}\,(K_{Рм})$]:

$$V^{н}_{с} = A^{н}_{бр} t - m\alpha^{н}_{общ} \Gamma^{н}_{0с}, \qquad (47')$$

где t — продолжительность межени в долях года; m — отношение меженного стока к годовому. Величина m может определяться как средняя из ряда маловодных лет или как средняя из всего ряда наблюдений. Последнее, согласно изложенному в § 12, является более обоснованным и осторожным.

Для определения сезонной составляющей емкости рассматриваемого (нижнего) водохранилища можно воспользоваться также формулой

$$V^{н}_{с} = (t \sum\nolimits_{2} A_{бр} - m\alpha^{н}_{общ} \sum\nolimits_{2} \Gamma_{0с}) - V'_{с} - V''_{с} - \ldots - V^{(n)}_{с}, \qquad (47'')$$

где $V''_{с}$, $V'''_{с}$, ..., $V^{(n)}_{с}$ — сезонные емкости остальных водохранилищ ниже раздельного створа.

При расчете полезной отдачи $A_{н}$ рассматриваемого водохранилища приток к нему может быть определен по формулам:

за год в период (n лет) сработки многолетней составляющей емкости (§ 14)

$$\Gamma_i = \frac{nA^{н}_{бр} - V^{н}_{м}}{n},$$

за интервал (межень) сработки сезонной составляющей емкости

$$M = A^{н}_{бр} t - V^{н}_{с}.$$

В формулах (47′) и (47″) при $\alpha^{н}_{общ} < K_{Рт}$ (или $K_{Рм}$), как показано в § 12, вместо $\alpha^{н}_{общ}$ должно быть принято $K_{Рт}$ (или $K_{Рм}$).

На этом заканчивается определение полезного объема водохранилища, и для получения общего объема остается добавить мертвый объем $V_{м.о}$ (см. § 7).

В результате общий объем проектируемого водохранилища для данного коэффициента регулирования $\alpha^{н}_{с}$ будет равен

$$V^{н}_{о} = V^{н}_{к} + V^{н}_{с} + V^{н}_{м.о}.$$

При расчете других значений $\alpha^{н}_{с}$ все проделывается в том же порядке, и таким же образом снова определяется раздельный створ, который, как указано выше, может менять свое положение с изменением $\alpha^{н}$ рассматриваемого водохранилища.

Каскад из двух водохранилищ, очевидно, представляет простую систему; расчет ниже расположенного из них определяется следующими условиями.

При $\alpha^{н}_{с} < \alpha^{в}_{с}$ ниже расположенное водохранилище рассчитывается как изолированное, но по стоку с собственного водосбора; при $\alpha^{н}_{с} > \alpha^{в}_{с}$ оно рассчитывается в системе с верхним по вышеизложенной методике. Расчет изолированного водохранилища также представляет частный случай расчета системы, у которой выше данного водохранилища $\alpha^{в}_{общ} = 0$, а потому

$$\alpha^{н}_{общ} = \alpha_{изол}; \quad \sum_1 \Gamma_{0с} = 0; \quad \sum_2 \Gamma_{0с} = \Gamma_{0\,изол}; \quad C_v = C_{v\,изол}.$$

В заключение следует отметить, что водохранилища, работающие в системе, могут рассчитываться каждое на свою обеспеченность, но при этом для каждого из них (со своей обеспеченностью) должны быть приведены к той же обеспеченности коэффициенты регулирования всех выше лежащих водохранилищ. Например, если все верхние водохранилища рассчитаны на обеспеченность $P = 97\%$, а нижние необходимо рассчитать на обеспеченность $P = 90\%$, то для этого предварительно надо определить коэффициенты регулирования всех верхних при $P = 90\%$, т. е. привести их к заданной обеспеченности рассматриваемого водохранилища, и затем сделать расчет по вышеизложенному.

Пример. Схема регулирования стока, по которой необходимо произвести расчет системы водохранилищ для обеспеченности отдачи $P = 97\%$, показана на рис. 106. Предположим, что три верхних водохранилища уже рассчитаны и для них выписаны все параметры. Далее следует водохранилище № 4, характеристики которого требуется определить. Это выполняется в следующем порядке.

1. Расчет для $\alpha^{н}_{с} = 0{,}75$; $A^{н}_{бр} = 0{,}75 \cdot 23{,}5 = 17{,}6$ млн. м³/год.

Начнем отбор водохранилищ, включаемых в расчет по менее зарегулированному каскаду водохранилищ № 4, 2, 1. Для водохранилища № 2 имеем

$$\alpha_{с} = 0{,}59 < 0{,}75; \quad \alpha^{в}_{общ} = 0{,}618 < 0{,}75.$$

Следовательно, включаем в расчет водохранилище № 2. При этом

$$\alpha^{н}_{общ} = \frac{16{,}85 + 17{,}6}{28{,}6 + 23{,}5} = 0{,}66.$$

Водохранилище № 1 в расчет не попадает, так как для него

$$\alpha_{с} = 0{,}67 > 0{,}66; \quad \alpha^{в}_{общ} = 0{,}67 > 0{,}66.$$

С учетом водохранилища № 2 переходим ко второй ветви системы. Очевидно, что водохранилище № 3 также не может быть включено в расчет, так как для него

$$\alpha_c = 0{,}72 > 0{,}66, \quad \alpha^{в}_{общ} = 0{,}72 > 0{,}66.$$

Таким образом, водохранилище № 4 при данном $\alpha^{н}_{с} = 0{,}75$ должно рассматриваться в системе только с водохранилищем № 2, и остальные его расчетные характеристики будут следующие:

а) многолетняя составляющая объема (по рис. 38 для $C_v = 0{,}5$ и $\alpha = 0{,}66$) $V^{н}_{м} = 0{,}58(28{,}6 + 23{,}5) - 10{,}9 = 19{,}3$ млн. м³;

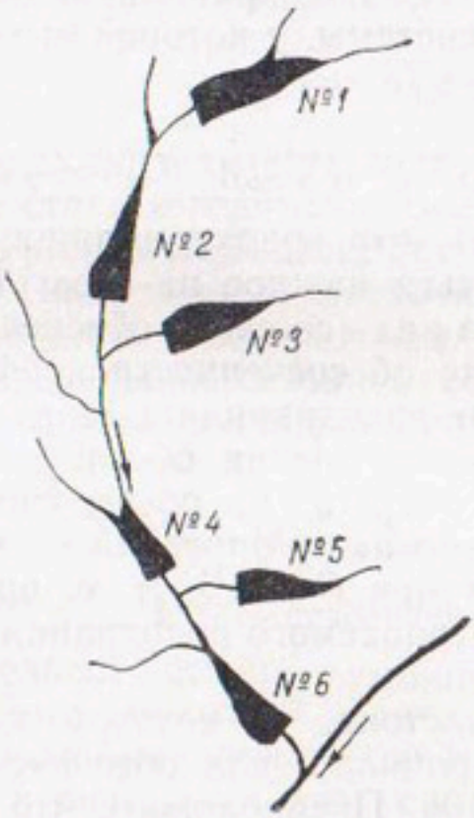


Рис. 106. Система водохранилищ (к примеру расчета в гл. XI).

Данные к расчету: *1)* для водоема № 1: $\Gamma_{0с} = 16{,}9$ млн. м³, $C_v = 0{,}50$, $\alpha_с = 0{,}67$, $A_{бр} = 11{,}3$ млн. м³, $V_м = 10{,}2$ млн. м³, $\alpha^{в}_{общ} = 0{,}67$; *2)* для водоема № 2: $\Gamma_{0с} = 28{,}6$ млн. м³, $C_v = 0{,}50$, $\alpha_с = 0{,}59$, $A_{бр} = 16{,}85$ млн. м³, $V_м = 10{,}9$ млн. м³, $\alpha^{в}_{общ} = 0{,}618$; *3)* для водоема № 3: $\Gamma_{0с} = 22{,}7$ млн. м³, $C_v = 0{,}50$, $\alpha_с = 0{,}72$, $A_{бр} = 16{,}3$ млн. м³, $V_м = 17{,}9$ млн. м³, $\alpha^{в}_{общ} = 0{,}72$; *4)* для водоема № 4: $\Gamma_{0с} = 23{,}5$ млн. м³, $C_v = 0{,}50$.

б) сезонная составляющая объема [по формуле (47′) при $t = \frac{10}{12}$ и $m = 0{,}45$] $V^{н}_{с} = \frac{10}{12} \cdot 17{,}6 - 0{,}45 \cdot 0{,}66 \cdot 23{,}5 = 7{,}8$ млн. м³;

в) мертвый объем $V^{н}_{м.о} = 1{,}8$ млн. м³;

г) общий объем $V^{н}_{о} = 28{,}9$ млн. м³.

2. Расчет для $\alpha^{н}_{с} = 0{,}90$; $A^{н}_{бр} = 21{,}1$ млн. м³/год. Включаем водохранилище № 2 ($\alpha^{н}_{общ} = 0{,}727$). Как видно, в этом случае и водохранилище № 1 также должно быть включено в расчет, так как для него

$$\alpha_с = 0{,}67 < 0{,}727, \quad \alpha^{в}_{общ} = 0{,}67 < 0{,}727.$$

Включаем водохранилище № 1 ($\alpha^{н}_{общ} = 0{,}715$). При этом водохранилище № 3 в расчет еще не попадает, так как

$$\alpha_с = 0{,}72 > 0{,}715, \quad \alpha^{в}_{общ} = 0{,}72 > 0{,}715.$$

Остальные параметры водохранилища № 4 при $\alpha_с^н = 0{,}90$ будут следующие: $V_м^н = 31{,}9$ млн. м³, $V_с^н = 10{,}05$ млн. м³, $V_{м.о}^н = 1{,}8$ млн. м³, $V_о^н = 43{,}75$ млн. м³.

При дальнейшем увеличении коэффициента регулирования $\alpha_с^н$ водохранилища № 4, очевидно, в расчет войдет также и водохранилище № 3. После окончания расчетов по водохранилищу № 4 следует перейти к расчетам по водохранилищу № 5 и затем по водохранилищу № 6.

Определение полезной отдачи, т. е. исключение потерь из полученной зарегулированной отдачи водохранилища в соответствии с устанавливаемым периодом его сработки излагается в § 14.

II. Расчет емкости и вероятных водохозяйственных характеристик водохранилища в каскаде. Выше изложен прием определения только необходимой емкости водохранилища для известной его годовой отдачи брутто $A_{бр}$. Однако в ряде случаев в гидротехнической практике важное значение имеет также вероятность и величина сбросов из водохранилища, частота его наполнений к началу и концу межени, а также обеспеченность дефицитов отдачи. Порядок расчета, приемлемого для подобных случаев, изложен ниже. Все кривые обеспеченности стока и наполнений строятся не в относительных, а в абсолютных величинах (в млн. м³).

Расчет ведется по годовым объемам стока, т. е. отдельно для многолетней и сезонной составляющих емкости. Аналогичными являются также расчеты по фазам годового стока, дающие всю полезную емкость водохранилища. Но эти расчеты чрезвычайно громоздки даже для двухступенчатого каскада и поэтому могут выполняться лишь в особых случаях. Для массовой же проектной практики они должны быть более доступными.

Расчетные операции и построения выполняются в следующем порядке [79].

1. Для первого, верхнего, водохранилища по рис. 38 (или по другим источникам) находится многолетняя составляющая емкости $V_м = \beta_м \Gamma_0$. Затем намечается произвольная кривая обеспеченности этой составляющей, которая должна начинаться с величины $V_м$ и проходить вниз, пересекая ось абсцисс в точке с заданной обеспеченностью. Кривая разбивается на ступени, каждая из которых, включая и ступень с высотой, равной нулю (перебои), суммируется с кривой обеспеченности годового стока, исключая годовую отдачу брутто $A_{бр}^{(1)}$. Иначе говоря, обычным порядком строятся частные кривые обеспеченности наполнений, которые затем суммируются. Эти промежуточные построения и суммирования частных кривых (на рис. 107 не показаны) продолжаются до наступления искомой устойчивой формы общей кривой обеспеченности наполнений к началу года (рис. 107 *а*), которая в начале расчета была произвольной.

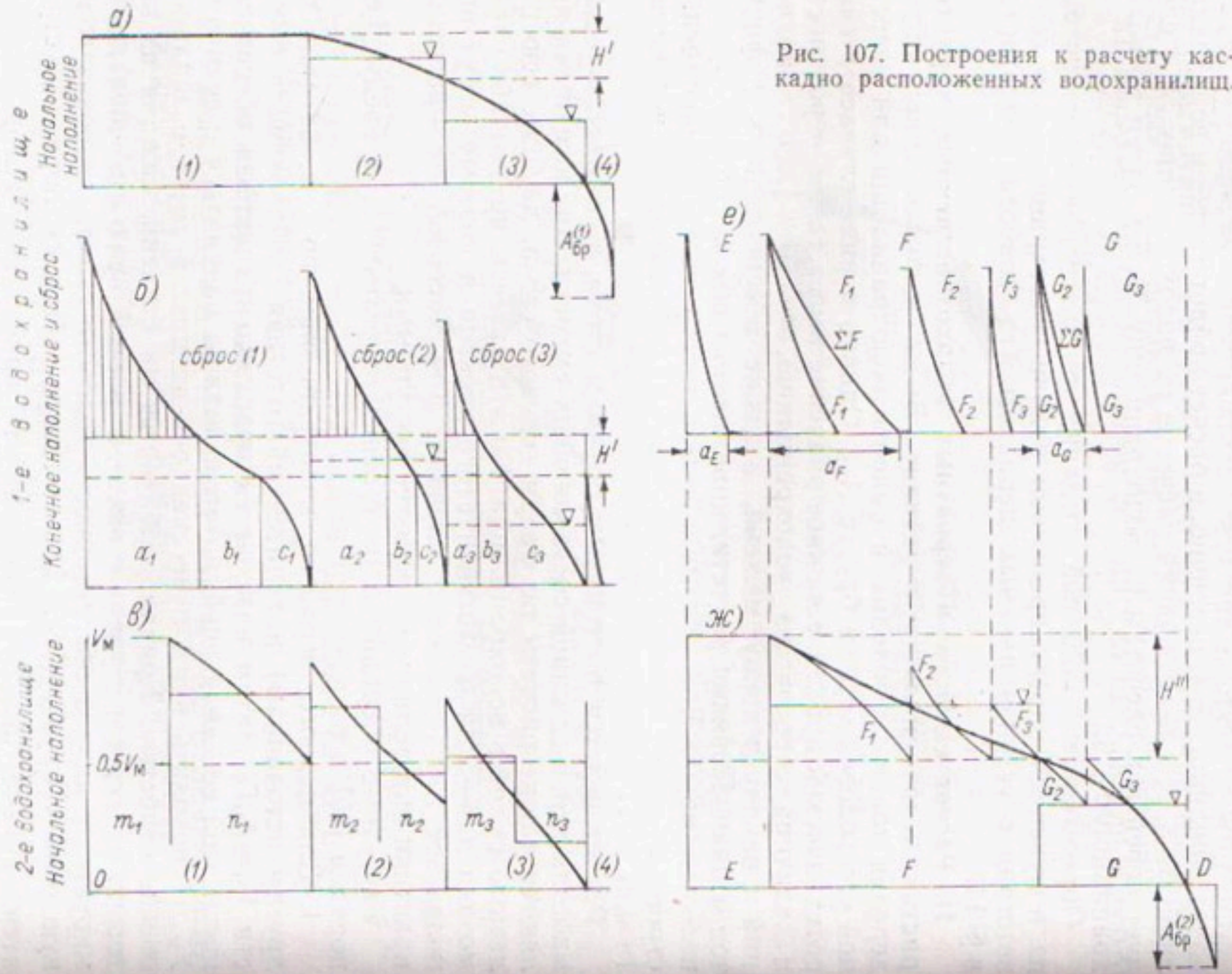
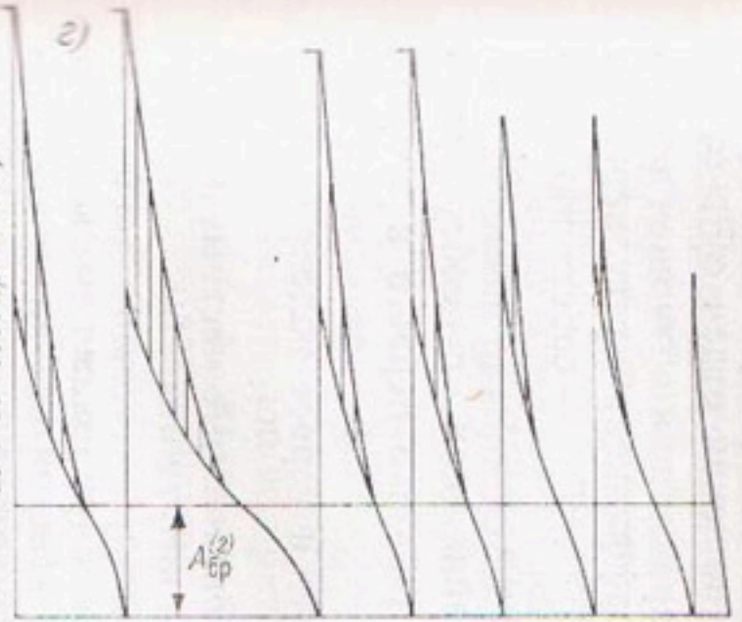


Рис. 107. Построения к расчету каскадно расположенных водохранилищ.

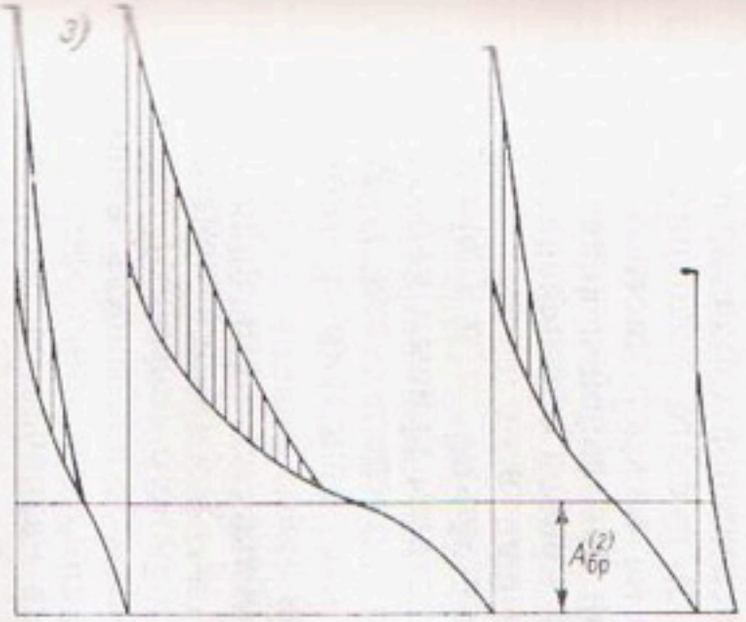
2-е водохранилище

Собственный сток и сброс из 1-го водохранилища

г)

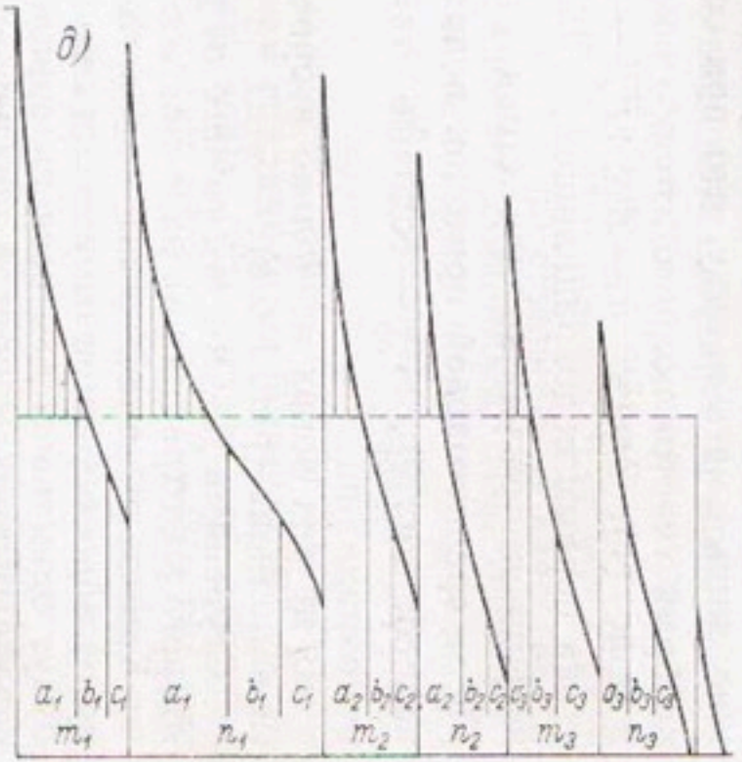


з)

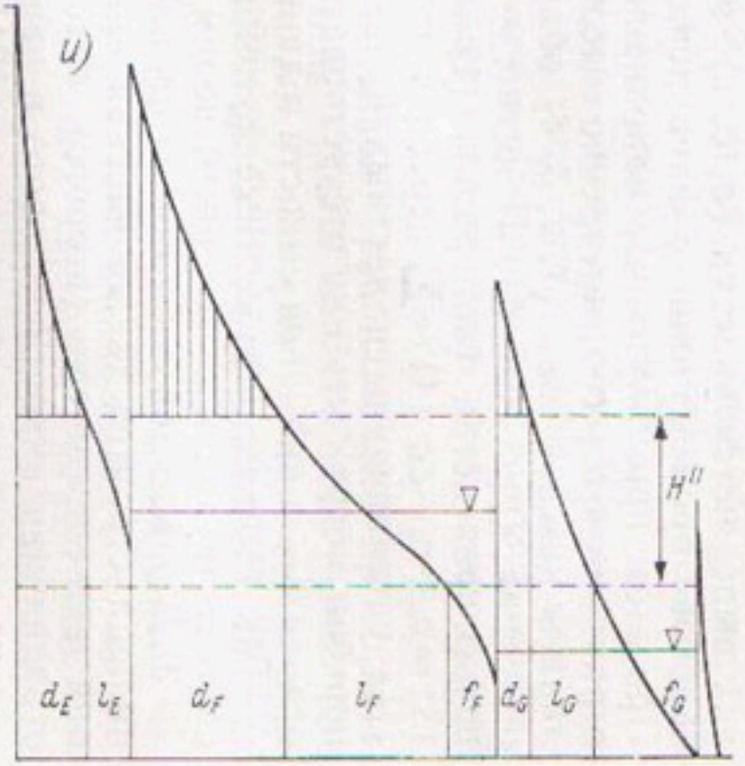


Конечное наполнение и сброс

д)



и)



2. Кривая обеспеченности наполнений водохранилища заменяется ступенчатой диаграммой со ступенями (*1*), (*2*), (*3*), (*4*) (последняя — дефициты или перебои). Каждая ступень суммируется с кривой обеспеченности годового стока, исключая годовую отдачу брутто. На полученных частных кривых обеспеченности наполнений выделяются участки (*a*, *b*, *c*): заполненной емкости, а также сбросов, промежуточного наполнения и пустого водохранилища. При этом промежуточные наполнения на каждой частной кривой ограничиваются соответственно высотой начальной и конечной ординаты каждой зоны (*1*, *2*, *3*, *4*) общей кривой обеспеченности наполнений (рис. 107 *б*). Понятно, что при этом должны соблюдаться равенства (контроль): $(1)=a_1+a_2+a_3$; $(2)=b_1+b_2+b_3$; $(3)=c_1+c_2+c_3$; $(4)=\sum$ перебоев по частным кривым наполнения. (На установившихся частных кривых в пределах зон *1*, *2*, *3*, *4* перебои могут быть или отсутствовать, что зависит от соотношения отдачи $A_{бр}$ и наличной емкости в данной зоне.)

Так выявляются частные кривые обеспеченности наполнений, соответствующие выделенным зонам *1*, *2*, *3*, *4* общей кривой.

3. Для каждой зоны общей кривой верхнего (первого) водохранилища строится также частная кривая обеспеченности наполнений нижележащего (второго) водохранилища, многолетняя составляющая емкости которого в начале назначается предположительно или из расчета по методу 1941 г.

Вначале каждая частная кривая намечается произвольно. Нужно лишь иметь в виду, что при соотношении отдач $\alpha_c^{(2)}>\alpha_1$ некоторый участок полного второго водохранилища возможен только в зоне (*1*). Здесь $\alpha_1=A_{бр}^{(1)}:\Gamma_0^{(1)}$ — коэффициент регулирования стока первым водохранилищем; $\alpha_c^{(2)}=A_{бр}^{(2)}:\Gamma_{0c}^{(2)}$ — собственный коэффициент регулирования стока вторым водохранилищем; $\Gamma_0^{(1)}$, $\Gamma_{0c}^{(2)}$ — среднегодовой приток к водохранилищам с собственного водосбора; $A_{бр}^{(1)}$, $A_{бр}^{(2)}$ — годовые отдачи брутто первого и второго водохранилищ.

В других зонах не только второе, но и первое водохранилище не заполнено (рис. 106 *в*).

Ступенями m_1, n_1; m_2, n_2; m_3, n_3 произвольные частные кривые второго водохранилища разделяются на интервалы.

Кривые обеспеченности годового стока со второго (собственного) водосбора при отсутствии связи между стоками смежных лет будут одинаковы для всех интервалов. Наносятся они по соответственным точкам кривой обеспеченности стока первого водосбора при использовании уравнения регрессии, связывающего сток первого и второго бассейнов.

Для определения коэффициентов корреляции и регрессии в упомянутом уравнении годовые частные объемы стока (как и модули стока) первого, второго и других водосборов выявляются и строго увязываются по длине реки на основании имеющихся данных гидрометрических наблюдений в ее бассейне.

При отсутствии или недостаточности гидрометрических данных кривая обеспеченности годового стока для промежуточного водосбора строится по статисти-

ческим параметрам стока, устанавливаемым приемами современной гидрологии. В ряде случаев C_v и C_s могут быть приняты те же, что и для первого водосбора.

Прибавляя к ординатам полученных кривых обеспеченности собственного стока соответствующие ординаты — сбросы из первого водохранилища, строим кривые обеспеченности общего притока ко второму водохранилищу (собственный сток плюс сброс сверху). В пределах каждой подзоны эти кривые одинаковы, но по зонам различны вследствие различия в сбросах (рис. 107 *г*).

Суммируя в пределах каждого интервала общую кривую притока с графиком-ступенью начального наполнения в данном интервале второго водохранилища и исключая его годовую отдачу брутто ($A^{(2)}_{бр}$), получаем частные кривые конечных наполнений этого водохранилища (рис. 107 *д*).

Абсциссы каждой частной кривой разбиваются пропорционально участкам *a*, *b*, *c* частной кривой первого водохранилища в пределах данной зоны (рис. 107 *д*) и строятся кривые начальных — конечных наполнений второго водохранилища, причем $\sum a = (1)$, $\sum b = (2)$, и т. д.

Расчет повторяется до получения искомых установившихся частных кривых наполнений второго водохранилища, т. е. до момента, когда при сложении частных кривых, нанесенных на рис. 107 *д*, образуются предшествующие кривые, показанные на рис. 107 *в*. При этом общая сумма абсцисс бесперебойных участков должна быть равна заданной обеспеченности отдачи.

4. После получения установившихся частных кривых обеспеченности начальных—конечных наполнений второго водохранилища (рис. 107 *в*) производится их суммирование параллельно с суммированием сбросов из первого водохранилища Для этого частные кривые наполнений разбиваются по ступеням. В качестве таких ступеней принимаются: полное водохранилище (E), от полного до 0,5 емкости (F), от 0,5 емкости до нуля (G) и от нуля до минус $A^{(2)}_{бр}$ (D). Границы этих ступеней по высоте отмечены на частных кривых (рис. 107 *в*).

Перенося по отдельности из каждой зоны (*1*, *2*, *3*) отрезки кривых, соответствующие принятым градациям наполнений F_1, F_2, F_3, G_1, G_2 и т. д., находим новые зоны, соответствующие ступеням второго водохранилища: E (если $\alpha^{(2)}_c > \alpha_1$, то $E = E_1 = m_1$; рис. 107 *в*); $F = F_1 + F_2 + F_3$; $G = G_1 + G_2 + G_3$. При этом кривые в результате их сложения дают общую искомую кривую обеспеченности наполнений второго водохранилища (рис. 107 *ж*).

Для каждого участка E, F_1, F_2 и т. д. строим кривую обеспеченности сбросов зон *1*, *2*, *3* первого водохранилища, умножая абсциссы аналогичных кривых указанных зон на соответствующие соотношения $\frac{E}{(1)}$, $\frac{F_1}{(1)}$, $\frac{F_2}{(2)}$, $\frac{G_1}{(1)}$, и т. д. (рис. 107 *е*). Суммируя кривые обеспеченности сбросов в пределах каждой новой зоны (E, F, G), получаем кривые обеспеченности сбросов ($\sum E$, $\sum F$, $\sum G$), привязанные к новым зонам (рис. 107 *е*).

Понятно, что сумма обеспеченностей сбросов равна $a_1+a_2+a_3=a_E+a_F+a_G$.

5. Прибавляя ординаты кривых сбросов к ординатам ранее полученных кривых обеспеченности частного стока со второго водосбора (одинаковых для всех зон — E, F, G), строим кривые обеспеченности общего притока ко второму водохранилищу (рис. 107 *з*).

В пределах каждой из трех ступеней E, F, G производится сложение соответствующей кривой обеспеченности общего притока и начального наполнения (с исключением отдачи брутто $A^{(2)}_{бр}$), т. е. аналогично рис. 107 *б* строятся частные кривые обеспеченности наполнений второго водохранилища и сбросов из него в третье (рис. 107 *и*).

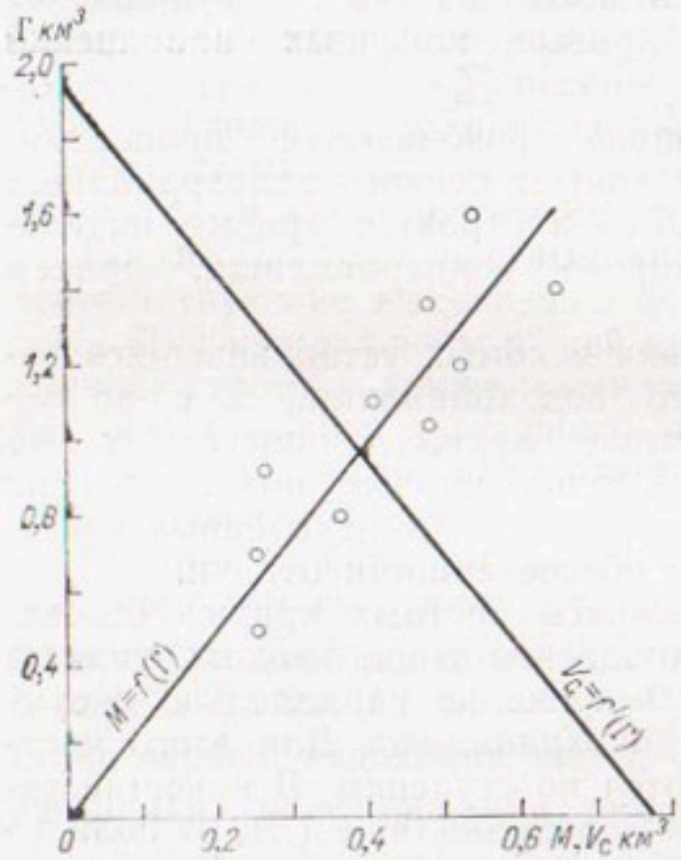


Рис. 108. Зависимость объема стока межени и необходимой сезонной емкости от объема годового стока $M=f(\Gamma)$; $V_c=0{,}833A_{бр}-M$ при $A_{бр}=a\Gamma_0=0{,}93$ км³/год.

6. Подобно схеме рис. 107 *в*, назначаются произвольные частные кривые обеспеченности наполнений третьего водохранилища, соответствующие ступеням второго — E, F, G.

В том же порядке повторяются расчеты для третьего, четвертого и других водохранилищ по нумерации их в каскаде сверху вниз.

7. Для определения сезонной составляющей емкости V_c ($V_п=V_м+V_c$) строится график зависимости объема меженного стока M_i от объема стока за год Γ_i по гидрометрическим данным, т. е. $M_i=f(\Gamma_i)$ (рис. 108).

Объемы стока M и Γ учитываются только с собственного водосбора каждого водохранилища, в связи с чем используемые данные гидрометрических створов, не совпадающих со створами плотин, должны быть соответственно пересчитаны и увязаны.

Величина сезонной составляющей при заданной отдаче равна (рис. 108)

$$V_c=kA_{бр}-M. \qquad (47^{*})$$

Здесь k — коэффициент, учитывающий часть годовой отдачи брутто, приходящуюся на время сработки сезонной составляющей емкости. При использовании всей отдачи равномерно в течение года и длительности периода низкого стока, равного десяти месяцам, $k=10:12=0{,}833$. При использовании годовой отдачи только

на орошение в течение пяти месяцев (например, май—сентябрь) $k=\frac{A_{бр}-r_7}{A_{бр}}$, где r_7 — потери из водохранилища за остальные семь месяцев без водопотребления при ходе наполнений от горизонта мертвого объема в начале октября до некоторого уровня к концу апреля в последнем году маловодного n-летия. В случаях, когда значение r_7 по сравнению с $A_{бр}$ невелико, принимают $k=1$. При этом величина M, как и график для нее $M=f(\Gamma)$, должны соответствовать в первом случае всей межени, во втором — пяти месяцам.

Сбросы из вышележащего водохранилища предполагаются только в период весеннего половодья.

Определение сезонной составляющей показано применительно к рис. 109 *а*, на котором представлена установившаяся кривая обеспеченности конечных наполнений многолетней части водохранилища, замененная ступенчатой диаграммой. Кривая пересекает ось абсцисс в точке $P=95\%$.

На установившиеся частные кривые конечных наполнений для года в целом (т. е. к началу межени, без учета внутригодовых колебаний стока) наносим частные кривые обеспеченности наполнений к концу межени (пунктир на рис. 109 *в*). Для этого по нескольким точкам кривой обеспеченности годового стока (рис. 109 *б*) определяются соответствующие им величины сезонной составляющей V_c (рис. 108), которые откладываются под упомянутыми точками вниз от каждой кривой обеспеченности наполнений за год (рис. 109 *в*).

Сезонная емкость равна нулю в точке с обеспеченностью, для которой в годовом стоке меженная часть его за пять—десять месяцев равна отдаче брутто за ту же часть межени. С увеличением обеспеченности необходимая сезонная емкость возрастает и достигает расчетной величины при годовом стоке, равном годовой отдаче брутто (рис. 109 *в*). От этих точек частные кривые обеспеченности наполнений к концу межени проводятся параллельно частным кривым за год. Так строятся частные кривые обеспеченности наполнений к концу межени. При суммировании частных кривых обеспеченности наполнений за год соответствующие кривые, относящиеся к концу межени, также складываются (рис. 109 *а*). Для нижних водохранилищ сезонная составляющая, как и в первом методе, рассчитывается по стоку с собственного водосбора.

Таким образом, и в этом приеме строгость расчета распространяется лишь на многолетнюю составляющую емкости. Сезонная же часть емкости учитывается схематически (простейшую связь между ее величиной, годовым и меженным стоком можно учесть в любом методе раздельного расчета полезной емкости). Однако изложенный прием имеет преимущества по сравнению с первым методом, так как он дает не только обеспеченность работы водохранилища, но и характеристики его режима — сбросы, наполнения, дефициты (на продолжении кривых обеспеченностей в зоне

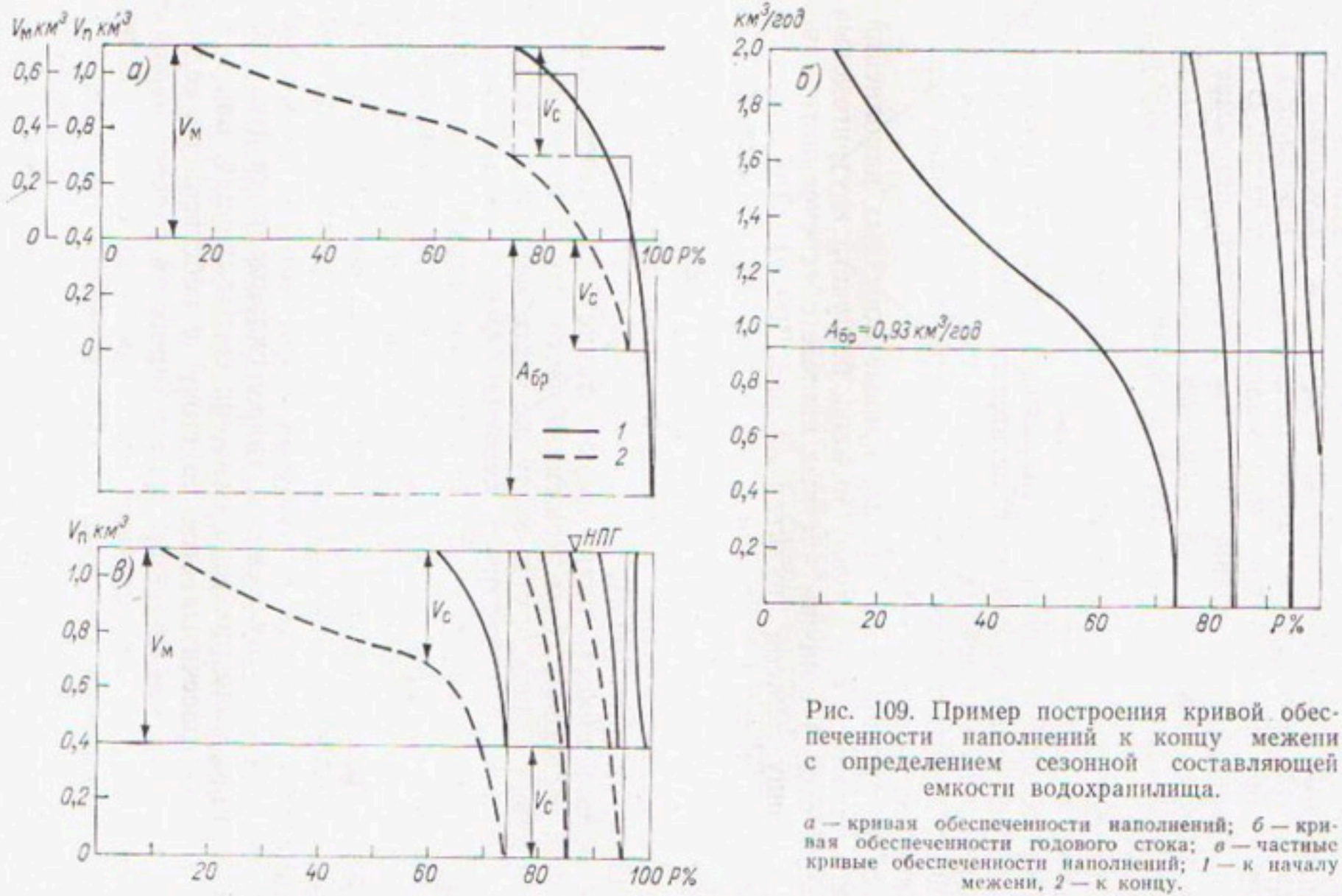


Рис. 109. Пример построения кривой обеспеченности наполнений к концу межени с определением сезонной составляющей емкости водохранилища.

а — кривая обеспеченности наполнений; *б* — кривая обеспеченности годового стока; *в* — частные кривые обеспеченности наполнений; *1* — к началу межени, *2* — к концу.

отрицательных ординат). В ряде случаев выявление этих характеристик бывает необходимо.

Согласно изложенному, предварительно принятая емкость второго водохранилища может не удовлетворять заданной обеспеченности, судя по пересечению стабильной кривой обеспеченности наполнений многолетней составляющей с осью абсцисс. Потребуется изменить $V_м$ и повторить расчет для подтверждения соответствия между $V_м$ и $P\%$. Предварительно же емкость $V_м$ может быть определена по методу 1941 г., изложенному выше.

Рассмотренный прием все же довольно сложен даже при двух-трех ступенях каскада. Поэтому он применяется в случаях, когда, кроме полезной отдачи, требуется установить характеристики сбросов, наполнений и перебоев.

Во всех прочих случаях, в особенности при расчетах ступеней, замыкающих два-три каскада (при веерном расположении водоемов на основной реке и притоках), первый метод остается незаменимым.

Расчет многолетней емкости водохранилища в каскаде при независимом ходе стока по частям водосбора изложен В. А. Киктенко в 1972 г. [49].

§ 38. КАСКАДНОЕ И ОБОСОБЛЕННОЕ КОМПЕНСИРУЮЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Если ГЭС расположены на реках с асинхронным стоком (разновременное наступление на них периодов высокого и низкого стока или непараллельный ход стока одноименных сезонов), то используется естественная взаимная компенсация стока. Для каждой из этих ГЭС строят за многолетие кривые обеспеченности (продолжительности) среднемесячных зарегулированных мощностей и, суммируя их по ординатам, получают кривую суммарных равнообеспеченных мощностей.

Если же сначала просуммировать мощности по рекам в одни и те же месяцы за все многолетие, то затем можно построить кривую обеспеченности суммарных хронологических мощностей.

Разность ординат, снятых по второй и первой кривым для одинаковых обеспеченностей (90 или 95%), есть эффект от совместного использования изолированно зарегулированных мощностей по сравнению с суммой их величин той же обеспеченности, взятых по этим ГЭС порознь.

Выигрыш создается внутригодовой и многолетней асинхронностью стока (несовпадение цикличности стока по рекам). Он широко используется в энергосистемах с гидростанциями, размещенными на реках с разным режимом стока [113, 142]. Выигрыш возрастает, если к изолированному регулированию добавляется компенсирующее. Объединенные электрической связью установки получают возможность компенсирующего регулирования мощностей при помощи водохранилищ. Последние могут располагаться не в виде каскада

со строгим размещением регулирующих объемов, как это необходимо для компенсации дефицитов воды у ниже расположенных потребителей, а при достаточно произвольном чередовании емкостей в каскадах и даже на разных реках.

Крупные водохранилища ГЭС коренным образом перераспределяют отдачу на своих установках, приспособляя ее к неравномерной отдаче слабо регулирующих ГЭС. Например, провал выработки ГЭС при очень низком стоке на реке без регулирования возмещается усиленной сработкой водоема регулирующей ГЭС на второй реке. И наоборот, значительный приток к первой ГЭС дает возможность снизить отдачу второй, т. е. перейти к наполнению водоема-регулятора. Такое взаимодействие разных установок позволяет нерегулярно получаемый повышенный (сверх изолированно обеспеченного) сток или мощности первой ГЭС перевести в категорию гарантированных, в чем и проявляется эффект от компенсирующего регулирования.

Обособленно обеспеченная ($P=90\div95\%$) мощность всех ГЭС, объединенных энергосистемой Северо-Запада, повышена на 15—17% за счет асинхронности стока рек и еще на 10% при компенсирующем регулировании мощностей системы Витебской ГЭС (см. «Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии», ч. 1. Минводхоз, СССР, НИИВП, Минск, 1966). Такое регулирование применяется и в Кольской энергосистеме. Эффект электрической компенсации используется также в результате соединения Красноярской ГЭС на Енисее и Братской на Ангаре. Основная часть годового стока Енисея (70%) приходится на четыре месяца (май—август), 23% стока проходит осенью и только 7% зимой. Сток Ангары хорошо выравнен оз. Байкал. В ходе стока этих рек наблюдается асинхронность. На Енисее маловодные периоды длятся 2—3 года, а на Ангаре они бывают до 10 лет. По времени маловодья не совпадают. Указанная асинхронность стока этих рек, благоприятная для совместной работы гидростанций на них, дополняется водохозяйственными возможностями: Красноярская ГЭС имеет водохранилище для сезонного, а Братская для глубокого многолетнего регулирования. Она будет вести электрическую компенсацию системы, причем гарантированная мощность двух ГЭС повысится на 455 тыс. кВт, или на 12% по сравнению с суммой минимальных мощностей двух ГЭС при их независимом режиме.

Расчет электрической компенсации

Расчеты электрической компенсации, как и компенсации дефицитов воды у потребителей, выполняются по хронологическим рядам стока и с применением обобщений [115]. Но вместо расходов воды и емкостей водохранилищ учитываются их эквиваленты — мощности и энерговыработка.

Порядок расчета покажем на примере каскада из трех ГЭС [12]. Гидростанции А, Б, В (по течению) характеризуются данными, приведенными в табл. 84.

Таблица 84

Сведения о каскаде из трех ГЭС

ГЭС	Средний годовой сток, км³		Емкость водохранилища			Средний напор, м	Энергетический эквивалент емкости, мгВт-мес.
	полный	частный	км³	в долях от годового стока			
				полного	частного		
А	4,08	4,08	6,60	1,62	1,62	33,4	2200
Б	6,40	2,32	0,54	0,08	0,23	34,0	123
В	8,40	2,00	1,90	0,23	0,96	36,6	224

По своей емкости водохранилище А служит компенсатором системы, а на ГЭС Б и В желательно при этом держать высокие уровни. В результате достигается наибольшая энерговыработка каскада, так как: 1) транзитный сток из водохранилища А, а также частный сток установок Б и В будет проходить при высоких напорах на этих двух ГЭС; 2) высокий уровень водохранилища Б дает выигрыш в напоре больший, чем потеря его в пункте А (из-за подпора от Б). Такой же выигрыш дает высокий уровень на ГЭС В по сравнению с вызванными им потерями на установке Б. Общее увеличение напоров при высоких уровнях на ГЭС Б и В повышает энергетическую эффективность транзитного стока из водохранилища А.

Однако чем меньше ежегодная сработка двух нижних водохранилищ, тем больше потери воды на холостые сбросы. Но при сравнительно глубоком регулировании стока на всех ГЭС для данного каскада более выгодным оказывается по возможности длительное сохранение высоких уровней водоемов Б и В. Сработка их намечается лишь в размере, необходимом для регулирования собственного притока в маловодном году. Остальная часть их емкости используется для многолетнего регулирования и срабатывается только по исчерпании всего полезного объема водохранилища А. Наполняются же нижние водоемы в первую очередь.

Порядок расчета для одного года показан в табл. 85. Сперва собственным водоемом и по собственному стоку регулируется мощность ГЭС В (графа 4). Затем регулируется мощность ГЭС Б и В средним водохранилищем с использованием его частного стока (графы 8, 18, 19).

Для обоих расчетов строятся диспетчерские графики в координатах: мощность — энергия емкости водохранилища. Для ГЭС Б и В диспетчерские емкости на 1-е число каждого месяца приняты из расчетов регулирования мощностей по частному стоку обеспеченного маловодного года. Использование избытков намечено в течение двух последующих месяцев.

С помощью диспетчерских графиков выполняются расчеты регулирования мощностей одной ГЭС В и двух ГЭС Б и В по

Год, месяц	Общая зарегулированная мощность всех ГЭС, мгВт-мес.	Энергоемкость вдхр В, мгВт-мес.	Зарегулированная на частном притоке мощность ГЭС В, мгВт	Энергия частного притока к вдхр В, мгВт-мес.	Аккумуляция энергии частного притока в вдхр В (5—4), мгВт-мес.	Энергоемкость вдхр Б, мгВт-мес,	Зарегулированная мощность ГЭС Б и В на частном притоке в вдхр Б, мгВт	Энергия частного притока в вдхр Б по напору ГЭС Б и В, мгВт	Аккумуляция энергии частного притока в вдхр Б (9—8), мгВт-мес.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1925—26									
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
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
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								

Примечания: 1. Энергоемкость водохранилищ дана на конец месяца.

2. По требованию энергосистемы общая среднегодовая обеспеченная мощ ние (ноябрь — апрель) — 162 мгВт. В июне мощность превышает обеспеченную нилище Б.

3. Обозначения: ΣH — общий напор трех ГЭС; $H_А$, $H_Б$ — напоры ГЭС А и

календарному ряду стока с частных водосборов, как указано выше. Затем зарегулированные мощности этих ГЭС (графы 4 и 8) суммируются с незарегулированными среднемесячными мощностями по естественному притоку к ГЭС А и напору всех ГЭС каскада (в табл. 85 эти суммы не показаны).

По ряду суммарных мощностей обобщенными методами или с построением интегральной кривой энерговыработки определяется суммарная обеспеченная мощность каскада при компенсирующем регулировании (графа 2). В последнем случае регулирование по кривой производится с использованием заданной энергоемкости водохранилища А, учтенной при напоре трех ГЭС.

Если в энергосистему входят также ГЭС на других водотоках с регулированием или без него, то их мощности по тому же ряду стока следует добавить к указанным суммам. В итоге для определения обеспеченной мощности энергосистемы при компенсирующем регулировании надо иметь по календарному ряду стока суммы мощностей ГЭС: а) работающих на естественных расходах; б) действующих на зарегулированных расходах, но не ведущих компенсирующего регулирования; в) ведущих компенсирующее регулирование и работающих на естественных расходах. При этом в случаях

Таблица 85

мощности каскада из трех ГЭС

Энергоемкость вдхр А, мгВт-мес.	Зарегулированная мощность трех ГЭС на стоке из вдхр А [2—(4+8)], мгВт	Энергия притока в вдхр А по напору трех ГЭС, мгВт-мес.	Аккумуляция энергии в вдхр А (13—12), мгВт-мес.	Мощность ГЭС А (12)· $H_А : \Sigma H$, мгВт	Мощность ГЭС Б на стоке из вдхр А (12)· $H_Б : \Sigma H$, мгВт	Мощность ГЭС В на стоке из вдхр А [12—(15+16)], мгВт	Мощность ГЭС Б на частном притоке (8)· $H_Б : (\Sigma H - H_А)$, мгВт	Мощность ГЭС В на частном притоке в вдхр Б (8—18), мгВт	Общая мощность ГЭС Б (16+18), мгВт	Общая мощность ГЭС В (4+17+19), мгВт
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
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
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
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

ность 159 мгВт делится: на летние месяцы (май — октябрь) — 156 мгВт и зим-
в связи с невозможностью зарегулировать энергию частного притока в водохра-

Б; вдхр — водохранилище.

а и б вводятся ограничения по установленной мощности. В дальнейшем в табл. 85 рассчитываются наполнения — сработка водохранилищ В и Б (графы 7, 9 и 10) и вычисляется регулирующая мощность всех ГЭС (графа 12) на стоке из водохранилища А. Эту мощность пропорционально напорам распределяем по всем ГЭС (графы 15, 16 и 17), затем находим полные мощности ГЭС Б и В (графы 20, 21) и подсчитываем наполнения — сработку водохранилища А (графы 11 и 14).

Последовательность сработки водохранилищ каскада ГЭС

В случаях регулирования стока не для одной ГЭС, а для каскада гидростанций, последовательно расположенных друг за другом, режим регулирования значительно усложняется. Каждая ГЭС при этом отличается своеобразием влияния выше лежащей установки, величинами притока с собственного водосбора, величинами напора, установленной мощности, относительной емкости (по отношению к среднему стоку) и т. п. Отдельные группы ГЭС могут иметь разный режим. Так, например, все гидростанции на р. Днестре при составлении схемы энергоиспользования реки, имеющей

большую протяженность, были разбиты на три группы, подключенные к трем различным энергосистемам.

Одним из наиболее важных вопросов регулирования стока по каскаду гидростанций или по частям каскада является вопрос об очередности опорожнения и наполнения водохранилищ. В период опорожнения этот вопрос должен рассматриваться каждый раз, когда на гидростанциях хотя бы в течение части этого периода имеется свободная мощность сверх той, которая участвует в работе системы. В этом случае имеется возможность маневрировать, перераспределяя мощности между отдельными ГЭС каскада наивыгоднейшим образом. Но если каждая из установок участвует в покрытии графика нагрузок полной своей мощностью, возможность маневрирования отпадает.

Сработка водохранилищ каскада ГЭС назначается в такой последовательности, чтобы сумма обеспеченных мощностей и энерговыработки по каскаду была наибольшей. В общем случае опорожнение выгодно начинать с верхнего водохранилища и переходить последовательно к ниже лежащим установкам. При этом весь транзитный сток и расходы за счет сработки проходят по каскаду при наибольших средневзвешенных (по расходам) напорах.

Совсем иное положение будет в случае, если сработка начнется с нижнего водохранилища. При такой схеме расходы за счет последующей сработки всех верхних водохранилищ проходят через ниже расположенные установки при пониженных напорах.

Наполнение также выгодно начинать с верхних водохранилищ (последовательно переходя на нижние), причем транзитный сток после их заполнения будет проходить через них при максимальных напорах; ниже расположенные водохранилища при этом будут заполняться одновременно с выше расположенными за счет дополнительного притока с собственных водосборов.

Последовательность наполнения с нижнего водохранилища приводит к тому, что весь сток проходит через выше лежащие гидроэлектростанции при минимальном напоре. Кроме того, в случае большого дополнительного притока с собственного водосбора нижнего водохранилища часть притока (после заполнения водохранилища), когда он превышает пропускную способность турбин нижней ГЭС, должна быть сброшена через водослив.

Однако в конкретных условиях наиболее выгодная последовательность опорожнения и наполнения водохранилищ зависит от указанных выше характеристик отдельных ступеней каскада. Поэтому окончательные правила опорожнения и наполнения каскада водохранилищ могут быть установлены только после тщательного анализа конкретных условий, основанного на расчетах по наиболее очевидным вариантам последовательности сработки и наполнения водоемов.

Наибольший эффект в энергоиспользовании реки каскадом гидростанций достигается при создании крупного водохранилища-регулятора на верхнем участке реки. Поэтому на практике всегда следует рассмотреть, возможно ли размещение крупного регулятора

стока выше всех или большинства основных ступеней каскада. Сработка должна начинаться с этих крупных верхних водохранилищ. В природе имеются аналогичные схемы (с самопроизвольной сработкой и наполнением регуляторов) и освоение их начато в первую очередь. Таковы р. Волхов с оз. Ильмень, р. Свирь с Онежским озером, р. Раздан с оз. Севан, р. Иртыш с оз. Зайсан и др.

В эксплуатационных условиях последовательность сработки и наполнения иногда может назначаться лишь по условию максимума энерговыработки, без возможности увеличения обеспеченных мощностей. Так обстоит дело, в частности, при пропуске половодья по каскаду ГЭС с малыми водохранилищами. В качестве примера можно привести каскад из трех гидростанций на Европейской территории СССР с водохранилищами по течению реки № 1, 2, 3, из которых ГЭС № 1 и 2 в состоянии задерживать только часть весеннего стока. Основной объем половодья, особенно в створе № 1, сбрасывается через плотину в нижний бьеф. Водосбор до ГЭС № 1 составляет $^2/_3$ общего водосбора до ГЭС № 2, а установленная мощность ГЭС № 1 в четыре раза меньше мощности ГЭС № 2. ГЭС № 3 почти не зависит от режима станций № 1 и 2, так как ее большое водохранилище выравнивает колебания режима мало зарегулированного стока верхних установок. Водохранилища ГЭС № 1 и 2 обычно к началу весны срабатывались до проектного минимума, затем наполнялись в период половодья за счет талого стока до проектных отметок, которые поддерживались в течение всей навигации. Зимой уровни водохранилищ начинали постепенно понижаться.

Пропуск половодий в первый период эксплуатации осуществлялся по следующей схеме. Перед началом половодья щиты на плотинах № 1 и 2 были закрыты. После заполнения водохранилища № 1 и набора полной мощности ГЭС № 1 щиты на этой ступени открывались, и начинался сброс воды через плотину к водохранилищу № 2, в котором уровень воды при этом начинал интенсивно повышаться и турбины ГЭС № 2 набирали полную мощность. При такой схеме пропуска половодья по каскаду гидростанций выработка ГЭС № 1 была наиболее высокой, так как напоры на ГЭС № 1 за весь период половодья были высокими.

Режим ГЭС № 2, наоборот, при такой схеме пропуска половодья был далеко не самым выгодным. В течение начального периода половодья водохранилище № 2 наполнялось сравнительно медленно в связи с незначительным поступлением воды из водохранилища № 1 (только через ГЭС) и за счет притока с собственного водосбора. При этом напоры на ГЭС № 2 в начальный период половодья были самыми низкими, а значит, самой низкой была и выработка ГЭС № 2.

С течением времени схема пропуска половодья на двух верхних ГЭС была пересмотрена. По новой схеме перед началом половодья щиты ГЭС № 1 открываются. При этом ГЭС № 1 в начале половодья работает с небольшими напорами, но зато весь приток реки, не задерживаясь в этом водохранилище, поступает в водохранилище

№ 2. Мощная ГЭС № 2 по новой схеме с самого начала половодья работает на более высоких напорах и отдает в сеть значительно бóльшую мощность, чем по первой схеме. Кроме того, вследствие более продолжительной работы этой установки с высокими расходами холостые сбросы через плотину № 2 резко уменьшаются. Так как мощность ГЭС № 2 в четыре раза больше мощности ГЭС № 1, то в результате введения новой схемы пропуска половодья энергосистема стала получать значительную дополнительную выработку энергии.

Таким образом, даже в небольшом каскаде наиболее выгодная очередность наполнения была обнаружена не сразу. Еще труднее выявить целесообразные варианты очередности продолжительной сработки водохранилищ по каскадам ГЭС.

Перейдем к попытке аналитического решения этой задачи.

Как уже отмечалось в § 34, сработка водохранилища с заполнением за счет уменьшения сбросов в паводок дает дополнительную выработку. Но вместе с тем происходит некоторая потеря энергии стока, проходящего транзитом при пониженных напорах за время сработки. Поэтому глубина сработки, очередность и продолжительность проведения ее по установкам каскада зависит от размеров частного притока, напоров ГЭС и емкостных характеристик водохранилищ. При соблюдении максимума выработки гидроэнергии, чему соответствует минимум потерь ее при регулировании стока, сработка водохранилищ определяется по условию равенства относительных потерь энергии

$$\frac{\partial П_1}{\partial Э_1} = \frac{\partial П_2}{\partial Э_2} = \ldots = \frac{\partial П_n}{\partial Э_n}, \qquad (86)$$

где 1, 2, ..., n — номера ГЭС по течению реки; $Э_i$, $П_i$ — выработка энергии по всему каскаду ГЭС при сработке на 1 см i-того водохранилища ($Э_i$) и связанные с этим потери энергии на всем каскаде ($П_i$).

Для выбора последовательности сработки используется энергетический показатель водохранилища K, что позволяет приблизиться к максимуму энерговыработки [51]. Этот показатель равен отношению выработки энергии за счет сработки объема воды к потерям энергии в результате понижения уровня водохранилища

$$K = \frac{\Delta Э_о - \Delta Э_н}{\sum \Delta Э_в} > 1{,}0, \qquad (87)$$

где $\Delta Э_о$ — потенциальная энергия элементарного объема водохранилища; $\Delta Э_н$ — снижение выработки энергии вследствие повышения уровня нижнего бьефа из-за увеличения расходов при сработке; $\Delta Э_в$ — вызванные понижением уровня водохранилища суммарные потери энергии за время от момента сработки элементарного объема до его заполнения последующим паводком.

Для каскада ГЭС с достаточно высоким напором можно пренебречь повышением нижнего бьефа из-за увеличения расхода при сработке ($\Delta Э_н \approx 0$). Тогда

$$K = \frac{F \sum H}{W_{пр} + \zeta \sum W_{тр}}, \qquad (88)$$

где F — площадь зеркала водохранилища; $\sum H$ — общий напор, при котором используются срабатываемые запасы воды; $W_{пр}$ — частный объем притока в рассматриваемое водохранилище за время от начала сработки до заполнения в следующее половодье; $W_{тр}$ — полный транзитный объем воды, поступающей с выше лежащей ГЭС за то же время; ζ — коэффициент потерь напора при сработке водохранилища

$$\zeta = \frac{\Delta Z' - \Delta Z}{h} = 1 - \frac{h'}{h}, \qquad (89)$$

где h — глубина сработки у плотины; h' — величина снижения подпора в хвосте водохранилища у выше лежащей ГЭС ($h' < h$); ΔZ, $\Delta Z'$ — падения свободной поверхности на всей длине водохранилища соответственно до и после сработки (по гидравлическому расчету, см. номограмму на рис. 115).

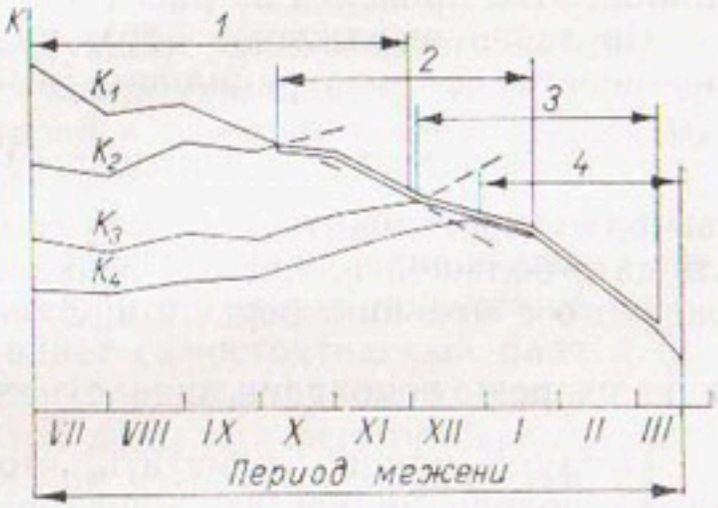


Рис. 110. Хронологические графики показателей экономичности четырех водохранилищ каскада ГЭС.

1, 2, 3, 4 — периоды и очередность сработки водохранилищ.

Коэффициент ζ может изменяться от единицы, когда данная установка не подпирает выше лежащую, до нуля, когда вся поверхность зеркала при сработке опускается одинаково и напор выше лежащей ГЭС увеличивается на ту же величину h (что свойственно широким и глубоким водохранилищам при большом подпоре нижнего бьефа упомянутой ГЭС).

В первую очередь должна срабатываться та емкость в каскаде, которая в данный, достаточно малый отрезок времени Δt обладает наибольшим показателем K. Водохранилище не срабатывается тогда, когда его показатель K меньше показателя срабатываемых емкостей.

По мере сработки водохранилища величина K уменьшается вследствие уменьшения напора и площади зеркала и увеличения коэффициента ζ из-за увеличения $\Delta Z'$ при сработке. В связи с этим наибольшее значение K, соответствующее на данном отрезке времени одной ГЭС, в следующем интервале может переместиться к другой.

Очередность сработки водохранилищ за межень выявится, если по формуле (88) построить хронологические кривые изменения

величин K по каждой ГЭС. Для этого требуются графики нагрузок системы и гидрографы притока (по расчету или прогнозу).

Величины K вычисляются с начала сезона сработки водохранилищ. Рассчитав значение K за время Δt_1, для которого по графику нагрузок требовалась сработка водохранилища с максимальным значением K, переходят к следующему интервалу Δt_2. Если K остается наибольшим для того же водохранилища, то продолжается его сработка, пока этот показатель не станет равным показателю другого водохранилища. С того момента должна начаться их совместная сработка. Другие емкости используются после уравнивания их показателей K и показателей для уже срабатываемых водохранилищ.

График изменения показателя K для системы четырех водохранилищ ГЭС приведен на рис. 110.

Согласно выражению (86), изложенная очередность сработки начинается с водохранилища, имеющего наименьшее значение $\frac{\partial П}{\partial Э}$, с соблюдением в дальнейшем равенства (86). В ряде случаев выгодно производить сработку выше расположенного водохранилища с большой площадью зеркала для заполнения ниже расположенного с меньшим зеркалом. Заполнять же целесообразно в первую очередь водохранилище с наибольшей величиной $\frac{\partial П}{\partial Э}$.

Следует, однако, отметить, что соблюдение очередности сработки водохранилищ на основании сравнения их показателей K, т. е. по принципу минимума потерь или максимума энерговыработки, дает лишь общее приближенное решение.

Известно, что максимум выработки гидроэнергии системы не всегда совпадает с минимумом расхода топлива в связи с неравномерным режимом тепловых станций. Кроме того, если при сработке происходит нарушение баланса мощности или баланса энергии системы вследствие падения располагаемой мощности турбин ГЭС при снижении напора и неблагоприятного распределения по месяцам выработки гидроэнергии, то указанный принцип соблюсти невозможно. В таких случаях очередность и режим сработки надо откорректировать. При этом величина и режим электропотребления системы сохраняются или наиболее экономично регулируются по потребителям.

Понятно, что до того момента, пока $K<1$, сработка данного водохранилища недопустима. Она может увеличить энерговыработку лишь в ближайшее время, но последующие потери будут больше этого увеличения, т. е. общая выработка уменьшится.

Следует отметить, что принцип максимума выработки энергии одной ГЭС каскада, как показано выше на примере каскада из трех ГЭС, противоречит условиям экономичности системы в целом и потому не должен применяться без особой в том надобности.

Компенсирующее регулирование стока для водопотребления и энергетики рассматривается в работах [26, 61, 75, 80, 115, 142].

Глава XII

ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СТОКА. ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

§ 39. ПРЕДПОСЫЛКИ К РЕГУЛИРОВАНИЮ СТОКА ПО КАЧЕСТВУ ВОДЫ[1]

Изменения качества воды, требующие планомерного ведения и периодического контроля водного хозяйства, зависят от гидрологических и водохозяйственных условий в бассейне реки и от регулирования стока данным водохранилищем.

Солевой, или ионный, состав воды, также являющийся гидрологической характеристикой, подвергается в водохранилищах изменению, что должно учитываться при регулировании стока.

Поскольку эта тема представляет самостоятельный раздел исследований, то здесь рассмотрены лишь те вопросы, которые являются определяющими для качества воды при регулировании стока и обнаруживаются прежде всего при изучении особенностей, свойственных природным водоемам.

Как известно, непроточные озера отличаются высокой минерализацией, доходящей до предела насыщения, при котором происходит выпадение солей из раствора. Это объясняется тем, что непрерывно поступающие с притоком воды растворенные соли не выносятся из озера, причем вода расходуется главным образом на испарение и в незначительной степени на фильтрацию. К непроточным соленым озерам относятся Балхаш, Иссык-Куль и др.

Иное явление представляют проточные озера или водохранилища, из которых соли (ионы) выносятся вместе со стоком воды. В связи с этим в проточных озерах образуются квазиустановившиеся внутригодовые и многолетние колебания минерализации, в общем довольно устойчивые по своей амплитуде для данного озера или водохранилища и в то же время отличающиеся некоторыми особенностями для отдельных лет (рис. 111). Кроме того, для водохранилищ следует различать пусковой период и установившуюся эксплуатацию.

---

[1] Вопросы качества воды связаны с явлениями из области гидрохимии и гидробиологии. Однако учет этих дисциплин не может быть изолированным от условий водного хозяйства. Наша задача сводится к тому, чтобы в пределах потребностей проектной практики дать общее представление о характере явлений и их связи с регулированием стока. При этом необходимым математическим анализом совершенно не подменяется существующий в природе закон физико-географической зональности в распределении озер и водоемов с различным осолонением.

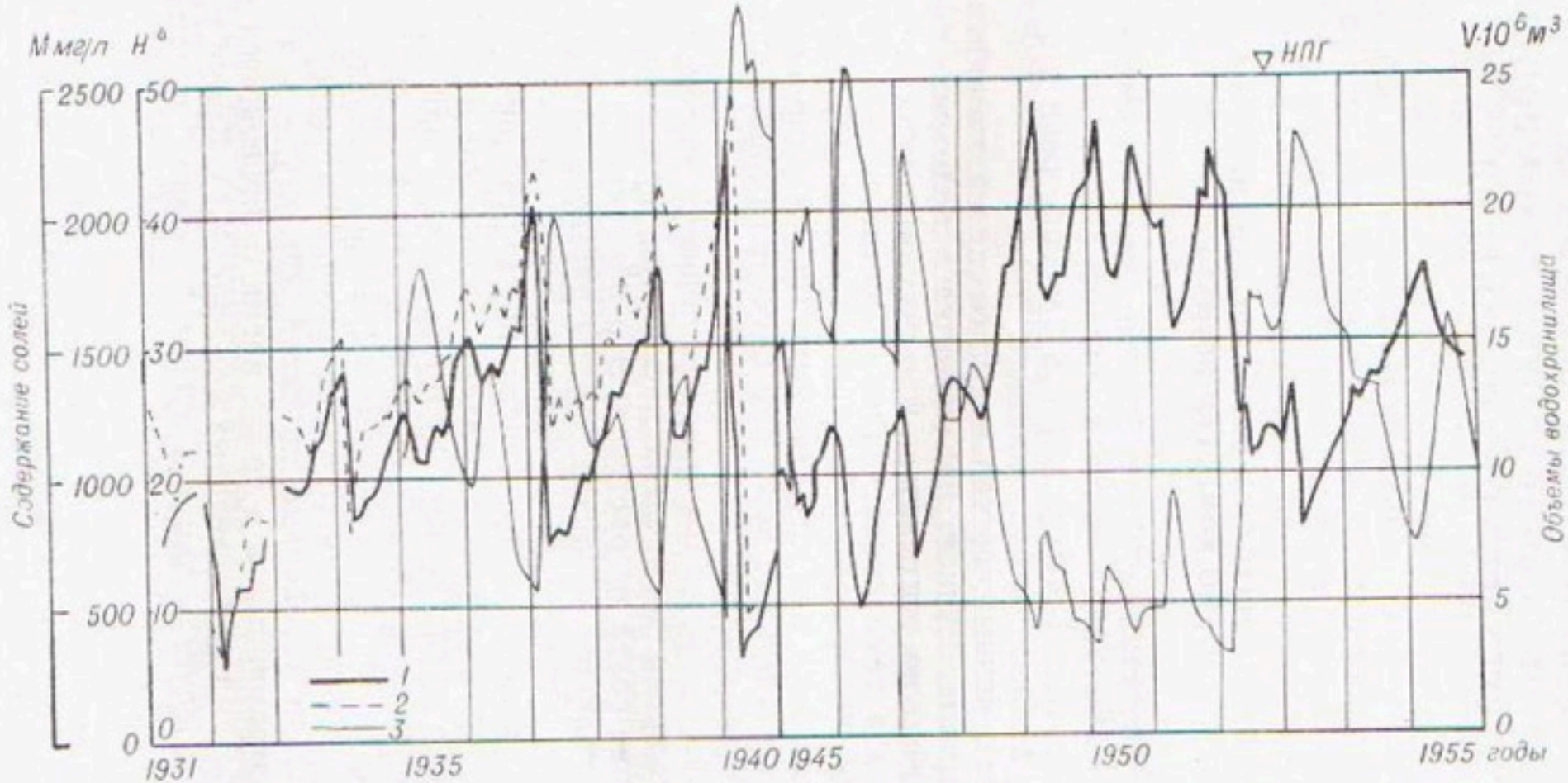


Рис. 111. Изменения минерализации и общей жесткости воды в Карловском водохранилище ($\alpha = 0{,}77$).

1 — содержание солей, *2* — общая жесткость, *3* — объем водохранилища (в 1932 и 1940 гг.— половодья со сбросом через водослив).

Регулируя сток воды, водохранилище вместе с тем регулирует и минерализацию воды в нем. При этом минерализация ограничивается известным пределом, что объясняется следующим образом.

Пусть в проточное озеро (или водохранилище) с водой без растворенных минеральных веществ в некоторый момент начнет поступать минерализованная вода. Вытекающий из озера поток, как и озерная вода, вначале не имеющий ионов, с течением времени начнет увеличивать свою минерализацию до некоторого предела. Эта предельная минерализация вытекающей воды будет равна минерализации притока, так как постепенно произойдет полная замена первоначальной озерной воды водой притока. [И наоборот, минерализованная вода проточного озера окажется неминерализованной (без ионов), если в озеро начнут впадать только притоки с неминерализованной водой. Изложенное имеет практическое значение для озер в смысле изменения их гидрохимического режима транзитной переброской через них водных масс из одного бассейна в другой при различных водохозяйственных мероприятиях (например, опреснение Веселовского водохранилища в донских степях пропуском через него воды р. Кубани).]

Кроме того, при наличии существенного испарения с зеркала водоема будет происходить накопление в нем растворенных солей. Одновременно с накоплением солей минерализация вытекающего из озера потока будет повышаться до тех пор, пока не установится равенство между количеством приносимых и уносимых из озера ионов. Соответствующая этому минерализация будет являться пределом для данных соотношений испарения, притока и стока. Упомянутый предел обычно во много раз ниже концентрации полного насыщения. В соответствии с этим проточные озера характеризуются как пресноводные, одни в большей, другие в меньшей мере, в зависимости от минерализации приточных вод и соотношения между объемом испарения и объемом вытекающей (или забираемой) воды. Таковы озера Ильмень, Селигер, Зайсан, Телецкое и др.

Водохранилища при любой водоотдаче α можно уподобить проточному озеру, так как непрерывное водопотребление из них и потери на фильтрацию, а также периодические сбросы через водослив по влиянию на солевой баланс водоема равноценны влиянию реки, вытекающей из проточного озера. Отсюда следует, что в водохранилищах-регуляторах и в проточных озерах имеются одинаковые условия для образования квазиустойчивого временно́го предела минерализации, при прочих равных условиях зависящего от соотношения притока воды и солей, отъема воды и солей и объема испарения.

Для доказательства того, что минерализация регулирующего водохранилища не может непрерывно расти (до полного насыщения), допустим, что поступление воды $П$ в наполненный водоем за довольно длительное время равно общему безвозвратному расходу воды, уходящей из него на опреснительный слив $С$, фильтрацию $Ф$, испарение $И$ и потребление $З$ (забор воды), т. е. $П = С + З + Ф + И$.

Поскольку сработка водоема отсутствует, то установится равенство солей поступающих и уходящих, т. е.

$$\mu П = \mu_{пр}(С + З + Ф),$$

откуда

$$\mu_{пр} = \left(1 + \frac{И}{С + З + Ф}\right)\mu, \qquad (90)$$

где μ — минерализация поступающей воды (естественный приток, подача из внешнего источника и т. п.); $\mu_{пр}$ — предельная минерализация воды в водоеме, возникающая при указанных условиях ($\mu_{пр} > \mu$).

На величину $\mu_{пр}$ можно воздействовать искусственно, при помощи расхода $С$. При $С = 0$ $\mu_{пр}$ — наибольшая; с увеличением $С$ значение $\mu_{пр}$ уменьшается и приближается к μ.

Как видно из приведенного обоснования предела минерализации и из формулы (90), упомянутый предел может расцениваться как относительный в зависимости от средней минерализации притока μ и от соотношения испарения $И$ и суммы $З + Ф$ (при $С = 0$).

Так, при непрерывном из года в год повторении этих величин, свойственных среднему году, устанавливается величина предела для минерализации в средние годы. Но для средних и многоводных лет в формуле (90) должны учитываться также и сбросы через водослив.

Для расчетных лет и периодов, в течение которых сбросов не было, значение $\mu_{пр}$ по формуле (90) является абсолютным возможным пределом минерализации и представляет важную гидрохимическую характеристику водохранилища.

Если величина μ является средней для притока за год, то и по формуле (90) предел минерализации $\mu_{пр}$ будет среднегодовым. Для получения его максимального внутригодового значения достаточно ввести коэффициент ρ внутригодовой неравномерности минерализации. При этом максимум предельной минерализации равен $(\mu_{пр})_{макс} = \rho\mu_{пр}$. Установленные по фактическим данным значения ρ обычно составляют 1,15—1,20.

Таким образом, минерализация воды при многолетнем регулировании стока не может быть выше определенного предела при данных соотношениях притока, испарения и расхода воды.

В условиях умеренного климата величина $\frac{И}{З + Ф}$ невелика, так как испарение обычно составляет 10—20% полной отдачи водоема. В результате для этих районов предельная среднегодовая минерализация сравнительно мало отличается от среднегодовой минерализации речного стока в маловодный период (не более чем на 30—50%).

При этом важно отметить, что многолетнее регулирование стока не только не может угрожать засолонением водохранилища, но влияет на качество воды тем благоприятнее, чем выше зарегулиро-

ванность стока. Решающим в данном случае становится то, что колебания объемов водохранилища в течение года являются менее резкими при больших α, в отличие от случаев незначительного регулирования стока [85]. В связи с этим меженный, весьма минерализованный приток оказывает меньшее влияние на динамику минерализации крупного (по отношению к среднему годовому стоку), медленно срабатывающегося (иногда за несколько лет подряд) водохранилища с большой отдачей α, аккумулирующего слабоминерализованные весенние воды. При низких величинах отдачи α меженный минерализованный приток каждого года имеет существенное значение в балансе малого, быстро срабатывающегося (в течение 1—2 лет) водохранилища. Поэтому в малых водохранилищах солевая концентрация с самого начала маловодного периода начинает резко возрастать и подвергается значительным колебаниям.

В больших же водохранилищах, сработка которых растягивается на 3—5 маловодных лет, за первые 1—2 года сработки, когда еще имеются большие наполнения и роль меженного стока относительно невелика, наблюдается менее ощутимый рост и колебание концентрации. И только в последующие маловодные годы, когда полезный объем приближается к концу, минерализация возрастает примерно до максимумов и подвергается резким колебаниям с такой же амплитудой, как и на малых водохранилищах, так как большое водохранилище к концу сработки приобретает свойства малого.

В результате большие водохранилища имеют преимущества по качеству воды по сравнению с малыми, так как:

а) в нормальных условиях работы, т. е. в условиях средних и тем более многоводных лет, большое водохранилище остается почти полным и срабатывается только в соответствии с неравномерностью внутригодового притока; по указанным причинам в эти годы наблюдается небольшая минерализация, в то время как в малых водоемах из-за существенной роли меженного стока концентрация в эти годы значительна;

б) кратковременные маловодные периоды являются более вероятными, чем длительные, и поэтому минерализация увеличивается сравнительно немного благодаря малой сработке большого водохранилища.

Таким образом, почти в течение всего многолетия (многоводные и средние годы, непродолжительные маловодные периоды и первые годы длительных маловодных периодов) солевой состав больших водохранилищ благоприятнее, чем малых; в остальное время (т. е. в последние годы сработки при длительных маловодных периодах) он не хуже, чем в малых водоемах. Это подтверждается материалами по ряду объектов и объясняется более интенсивным водно-солевым обменом с более полным освоением весеннего опресняющего стока в больших водоемах.

На фоне основных вышеприведенных качественных преимуществ высокого регулирования большие водохранилища (как и

малые) могут иметь разнообразный характер колебаний солевой концентрации, например, в течение длительного маловодного периода. Это зависит:

1) от водности и последовательности маловодных лет;

2) от величины и последовательности годовых объемов испарения;

3) от соблюдения плана водопотребления и режима эксплуатации (водозабор из верхних слоев воды зимой, когда заметна солевая стратификация водоема; сработка избыточных объемов воды перед весной; аккумуляция талого стока; локализация минерализованных рудничных и промышленных сточных вод и т. п.).

Из изложенного видно, что при прочих равных условиях, т. е. при независимом рассмотрении отдачи водохранилища как фактора непрерывного водно-солевого обмена, для качества воды желательно увеличение регулирования стока. При этом предельная минерализация по формуле (90) при прочих равных условиях не зависит от объема воды в водохранилище, что согласуется с трактовкой процесса установления предела минерализации. Величина объема оказывает влияние только на продолжительность процесса.

Всякие отклонения от установившегося на данный момент относительного равновесия в приходо-расходных статьях баланса воды и солей будут приводить к новому пределу быстрее на малом водохранилище, чем на большом. Этим объясняется то, что малые водоемы подвержены более резким колебаниям минерализации, чем большие, отличающиеся большей *гидрохимической инерцией* в смене процессов минерализации.

Известно, что в природе режим стока и факторы его минерализации, оставаясь периодически относительно устойчивыми, подвержены непрерывным изменениям, в одно время мало ощутимым, в другое — резким. В соответствии с этим водохранилище претерпевает обычно лишь смену процессов вследствие изменения условий. Не успевает наступить предел для относительно установившихся условий (испарение, водопотребление, фильтрация, приток, его минерализация), как происходит изменение их, и водохранилище переходит на новый процесс установления иного предела минерализации и т. д.

Отмеченный процесс, приводящий к временному предельному значению минерализации воды в водохранилище, подтверждается фактическим состоянием проточных озер и водохранилищ-регуляторов, а также расчетами солевой стабилизации водохранилища и используется для прогноза качества воды при регулировании стока [85], для расчета опресняющего водообмена [87] и т. п.

Останавливаясь на встречающемся иногда мнении относительно непрерывного нарастания минерализации воды при устройстве водохранилища, отметим, что по формуле (90) такой случай возможен только тогда, когда $C+З+Ф=0$ и весь приток затрачивается на испарение, что свойственно бессточным нефильтрующим

водоемам. При этом в соответствующих физико-географических условиях возникают самосадочные озера. Для водохранилища-регулятора такой случай нереален.

Наряду с этим встречаются случаи, когда забор воды из озера равен нулю ($З=0$), и при этом оно, будучи непроточным (замкнутым), все же остается пресноводным. Таковы озера Валдайское, Рубское, а также Святое из группы Косинских озер и др. Подобное явление объясняется: а) бедностью минеральных растворимых веществ в почвах и грунтах водосборного бассейна (эта предпосылка отпадает, если имеются засоленные водоемы-аналоги или если она не подтверждается химическим анализом грунтовых водных вытяжек) и б) наличием большой подземной фильтрации из озера-водоема, как видно из формулы (90). Последнее обстоятельство является дополнительным признаком для выяснения фильтрационных свойств чаши водоема.

В проточных озерах и водоемах-регуляторах, находящихся в природных условиях (без поступления в них сбросных шахтных и промышленных вод), минерализация, по фактическим данным, обычно не превышает показателей для грунтового притока, т. е. 2 кг/м³ (редко 3 кг/м³). Общая же растворимость солей, обычно встречаемых в речной воде, значительно больше этих цифр. Так, например, в процессе многовекового перехода с моря на сушу и обратно морская вода, расходуемая почти исключительно на испарение, достигла концентрации солей 35 кг/м³ (самосадочные озера имеют значительно бóльшую концентрацию).

Различная растворимость солей приводит с течением времени к тому, что в морях и в большинстве замкнутых бессточных водоемов при общем накоплении растворенных солей преобладают соли хлора (89%), отличающиеся наибольшей растворимостью, в то время как в речной воде преобладают соли угольной кислоты (карбонаты примерно 60%, хлориды 5%). В материковых бессточных водоемах иногда преобладают хорошо растворимые сульфаты.

Чем замедленней солеобмен, тем интенсивнее происходят количественные и качественные изменения раствора солей в водоеме. Так, в замкнутых природных озерах водно-солевой обмен отсутствует ($С+З+Ф=0$) и потому с течением времени обычно устанавливается полное солевое насыщение с преобладанием хлоридов или сульфатов, а процесс происходит тем быстрее, чем больше испарение.

Обратную картину, как показано выше, представляют водохранилища с интенсивным водно-солевым обменом, т. е. с возможно большим регулированием стока, а значит, и с возможно большей рабочей емкостью.

Переходя к рассмотрению гидрохимической роли мертвого объема, необходимо отметить следующее.

Мертвый объем наряду с инженерными требованиями (создание емкости для заиления водохранилища, напоров для гидростанции и т. п.) должен удовлетворять также и санитарно-техническим

условиям, имея в виду размеры мелководий, время года, на которое они приходятся, продолжительность стояния горизонтов мертвого объема и частоту появления их по годам.

Через речные проточные водохранилища как при большом мертвом объеме, так и при малом (рассматривая один и тот же общий объем) пропускается на отдачу, потери и сброс весь годовой сток воды и солей. При небольших мертвых объемах на опресняющий сброс через водослив в половодье за многолетие уходит воды меньше, чем при больших мертвых объемах.

На водохранилище сбросы в половодье оказывают не только опресняющее влияние (снижение концентрации солей), но и уменьшают суммарный остаток солей в водоеме, что имеет особое значение при поступлении в водоем шахтных и промышленных, весьма минерализованных вод.

В связи с изложенным увеличение мертвого объема при одной и той же общей емкости водохранилища оказывает различное влияние на качество воды:

1) ухудшает его в результате увеличения в многолетнем ряду средней действующей площади испарения из водоема;

2) улучшает его в результате увеличенных сбросов из водохранилища воды, а вместе с тем и солей.

Обычно при регулировании природного речного стока меньшему мертвому объему соответствует вода лучшего качества. Однако по водохранилищам для водоснабжения и орошения с небольшими мертвыми объемами это улучшение незначительно. Поэтому для таких случаев мертвый объем должен выбираться не по признаку минерализации, а по инженерным, экономическим и санитарно-техническим соображениям.

Но в случае поступления в водохранилище за межень большого количества солей, например при сбросе в реку рудничных и других минерализованных вод, по расчету бывает целесообразным увеличение мертвого объема (при заданном НПГ) с целью увеличения солевыносящих сбросов через водосливы. Такой случай отмечен при расчете Ханженковского водохранилища в Донбассе, регулирующего сток для водоснабжения Зуевской ГРЭС.

Заканчивая вопрос о предпосылках к регулированию стока по качеству воды, необходимо подчеркнуть следующее:

1) предел минерализации по условию установившегося водно-солевого баланса и при наличии более или менее существенных отъемов и утечки воды далеко не достигает в природе предела насыщения;

2) предел по формуле (90) является характеристикой верхнего возможного значения минерализации, которая в действительности может быть даже несколько ниже $\mu_{пр}$ по формуле, если допустить возможным некоторое взаимоограничение солей в процессе насыщения раствора при их различной растворимости;

3) предельная среднегодовая минерализация водоема по формуле (90) превышает обычно не более чем на 30—50% среднегодовую минерализацию маловодного года и в результате большей ча-

стью мало отличается от минерализации грунтового (меженного) притока;

4) для улучшения качества воды желательно возможно большее регулирование стока [см. знаменатель формулы (90)], однако при этом необходимо следить за изменением морфометрических элементов водоема в связи с увеличением α [1];

5) большое значение для качества воды имеет эксплуатационный режим водохранилища. При нормальной эксплуатации по правильно разработанному плану водного хозяйства можно получить оптимальное качество воды; при неправильном водопользовании можно увеличить солевую концентрацию водохранилища.

Окончательный выбор параметров водохранилища и периодическая корректировка его отдачи (см. § 16) должны производиться на основе сопоставления экономических и технических показателей при обобщенном учете качества воды в процессе регулирования стока.

§ 40. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПРОЦЕССА МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ СТОКА

В гидрологии выяснение различных вопросов по режиму водотока производится методом аналогов при отсутствии или недостатке фактических данных и приемами непосредственных гидрологических расчетов при наличии материалов наблюдений. Аналогично этому и в гидрохимии водоемов исследование их солевого режима намечается по двум основным путям: 1) сравнительному, дающему представление о качестве воды в водохранилище по сопоставлению с существующими водоемами-аналогами, и 2) аналитическому, излагаемому ниже.

Поскольку в регулирующих и проточных водоемах предельная минерализация весьма далека от полного или вообще значительного насыщения и обычно не превышает природной минерализации грунтового притока, можно пренебречь некоторым возможным взаимоограничением отдельных ингредиентов при их совместном растворении, а также ассимиляцией солей биогенными элементами — растительностью и планктоном.

При указанных обстоятельствах в расчете допускается свободное, без взаимоограничения, изменение составляющих раствор ингредиентов J, а следовательно, и общей минерализации, так как $\mu = \sum J$.

---

[1] Так, например, при увеличении α (а значит, и объема водохранилища) выше определенного значения удельная площадь зеркала на 1 м³ воды $f_{уд}$ может измениться в такой мере, что погасит преимущества высокого регулирования. Испарение и санитарно-технические условия будут в результате давать ухудшение качества воды с увеличением α. Но это зависит не от α как фактора водно-солевого обмена, а от морфометрии водоема, которая по величине $f_{уд}$ может быть при малом α менее благоприятной для качества воды, чем при большом, и наоборот.

Обращаясь к аналитическому исследованию минерализации в водоеме за отдельные отрезки времени и учитывая особенности работы водохранилища в разные периоды, рассмотрим два различных случая:

1) водохранилище работает без сбросов, когда происходит сработка водохранилища, например в период межени или вообще в расчетный маловодный период любой длительности, исчисляемый иногда несколькими годами;

2) водохранилище работает со сбросами, что наблюдается большей частью в средние и многоводные годы, в которые избыточное количество приточной воды (обычно весной), проходя через водохранилище, сбрасывается в нижний бьеф, увлекая за собой некоторое количество твердого стока в растворенном и взвешенном виде.

Введем следующие обозначения: T — расчетный интервал времени со сравнительно постоянным расходом (что должно соблюдаться при делении года); V_1 — начальный объем водохранилища; $Q_п$, $П$ — приток воды в единицу времени (м³/с) и за время T (м³); $Q_з$, $З$ — водопотребление из водохранилища; $Q_ф$, $Ф$ — фильтрация; $Q_и$, $И$ — испарение; $Q_л$, $Л$ — ледообразование; $\mu_е$ — минерализация притока [1] (естественная); μ_1 — минерализация, соответствующая начальному объему водохранилища; μ_2 — конечная минерализация (к концу времени T); V, t, μ — текущие координаты соответственно объема, времени и минерализации.

Работа водохранилища без сбросов

Изменение минерализации в связи с изменением объема водохранилища во времени в общем виде можно выразить так:

$$\mu_е Q_п\,dt - \mu(Q_з + Q_ф)\,dt = d(\mu V) = \mu\,dV + V\,d\mu. \qquad (91)$$

Объем водохранилища представим в виде следующей зависимости:

$$V = V_1 + (Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и)\,t. \qquad (92)$$

При этом

$$dV = (Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и)\,dt. \qquad (93)$$

Подставляя значения V и dV из формул (92) и (93) в формулу (91), получим

$$(\mu_е Q_п - \mu Q_п + \mu Q_и)\,dt = [V_1 + (Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и)\,t]\,d\mu.$$

---

[1] Минерализация притока $\mu_е$ определяется в виде постоянных значений $\mu_е$ для характерных интервалов года T или по связи $\mu_е = \varphi(Q_п)$ в зависимости от осредненных расходов притока. По этим данным устанавливается начальная минерализация водоема μ_1. Подробно об учете притока солей излагается в работе [85].

Разделяя переменные и переходя к интегрированию, напишем

$$\int_0^T \frac{dt}{V_1 + (Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и)\,t} = \int_{\mu_1}^{\mu_2} \frac{d\mu}{\mu_e Q_п + \mu\,(Q_и - Q_п)}.$$

При этом находим

$$\mu_2 = \frac{[\mu_e Q_п + (Q_и - Q_п)\,\mu_1]\left[1 + \dfrac{T\,(Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и)}{V_1}\right]^{\frac{Q_и - Q_п}{Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и}}}{Q_и - Q_п} -$$

$$- \frac{\mu_e Q_п}{Q_и - Q_п}.$$

Умножая расходы на T, т. е. переходя к объемам, будем иметь

$$\mu_2 = \frac{[\mu_e П + (И - П)\,\mu_1]\left[1 + \dfrac{П - З - Ф - И}{V_1}\right]^{\frac{И - П}{П - З - Ф - И}} - \mu_e П}{И - П}. \tag{94}$$

Для бесприточных периодов ($П = 0$) уравнение (94) примет вид

$$\mu_2 = \frac{\mu_1}{\left[1 - \dfrac{З + Ф + И}{V_1}\right]^{\frac{И}{З + Ф + И}}}. \tag{95}$$

Как видно, знаменатель формулы (95) представляет дробное число в положительной степени, в связи с чем он всегда меньше единицы. При этом μ_2 всегда больше μ_1, и только в том случае, когда $И = 0$, степень знаменателя превращается в нуль, и тогда $\mu_2 = \mu_1$.

В случае, если забор воды, фильтрация и испарение отсутствуют ($З = Ф = И = 0$), уравнение (94) приобретает вид формулы смешения

$$\mu_2 = \frac{\mu_1 V_1 + \mu_e П}{V_1 + П}. \tag{96}$$

Приведенная проверка граничных значений μ_2 подтверждает правильность формулы (94).

Для зимних условий, когда определенное количество воды $Л$ уходит на ледообразование, а $И = 0$, по аналогии с уравнением (94) можно вывести

$$\mu_2 = \frac{[\mu_e П + (Л - П)\,\mu_1]\left[1 + \dfrac{П - З - Ф - Л}{V_1}\right]^{\frac{Л - П}{П - З - Ф - Л}} - \mu_e П}{Л - П} \tag{97}$$

и соответственно для бесприточного периода

$$\mu_2 = \frac{\mu_1}{\left[1 - \frac{З + Ф + Л}{V_1}\right]^{\frac{Л}{З+Ф+Л}}}. \qquad (98)$$

Для случая, когда ледостав отсутствует, а испарение не принимается в расчет, по формуле (98) $\mu_2 = \mu_1$.

Работа водохранилища со сбросами

Расчет минерализации водохранилища для периода со сбросами осложняется тем, что в этом случае вместе с водой через водослив сбрасывается некоторое количество солей, трудно поддающееся учету в связи со сложными гидромеханическими явлениями в водохранилище во время сбросов. При этом одни считают, что вода, идущая на сброс, перед тем вполне перемешивается с водными массами резервуара. Другие утверждают, что приточная вода, сбрасываемая через водослив, по водохранилищу проходит поверху, не нарушая ниже лежащих водных масс.

Следует отметить, что последняя точка зрения ни в какой мере не согласуется с теорией неустановившегося движения потока, наблюдаемого в паводок, согласно которой в водохранилище происходит турбулентное движение воды по всему сечению, так же как и в реках [10, 71].

Перемешивание воды в водохранилище при прохождении паводка зависит также от ряда дополнительных условий [85].

На основании исследований Донбассводтреста и Укргидэпа установлено, что на водохранилищах Донбасса и Криворожья довольно заметная солевая стратификация наблюдается лишь зимой, вернее, при ледоставе (исключительно грунтовое питание и отсутствие волнения), в остальное время года с начала весеннего притока стратификация практически отсутствует. В связи с этим и имея в виду технически совершенное устройство и правильную эксплуатацию водохранилища, допускаем в своих выводах, что в период сбросов вода, проходящая через водохранилище, непрерывно перемешивается с наличным остатком ее на каждый данный момент. Гидрохимические процессы в водохранилище до начала сбросов будут происходить, как указано для случаев без сбросов.

Для упрощения выводов считаем, что за некоторый промежуток времени объем поступающей воды равен объему воды, уходящей на сброс, потребление и потери, т. е. не принимается во внимание трансформация притока, которая имеет значение лишь как явление гидравлическое. В гидрохимические процессы трансформация притока существенных изменений внести не может, так как процесс сброса при трансформации лишь несколько растягивается во времени. Иначе говоря, при одном и том же суммарном сбросе как без трансформации, так и при наличии ее объем сброшенных солей будет практически один и тот же.

Рассмотрим изменение концентрации солей в водохранилище за бесконечно малый отрезок времени. Количество притекающих солей будет равно

$$dS_1 = \mu_e Q_п \, dt.$$

Уход солей из водоема определяется по формуле

$$dS_2 = \mu Q_с \, dt + \mu Q_з \, dt + \mu Q_ф \, dt.$$

Подставляя в это уравнение значение среднего сбросного расхода

$$Q_с = Q_п - Q_з - Q_ф - Q_и,$$

найдем

$$dS_2 = \mu (Q_п - Q_и) \, dt.$$

Изменение количества солей в водохранилище составит

$$dS_1 - dS_2 = \mu_e Q_п \, dt - \mu (Q_п - Q_и) \, dt.$$

Этому соответствует изменение минерализации на величину

$$d\mu = \frac{\mu_e Q_п \, dt - \mu (Q_п - Q_и) \, dt}{V_0},$$

где V_0 — объем водохранилища при НПГ.

После разделения переменных имеем следующее выражение:

$$\frac{d\mu}{\mu_e Q_п + \mu (Q_и - Q_п)} = \frac{dt}{V_0},$$

для которого можно написать

$$\frac{1}{Q_и - Q_п} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \frac{d\mu}{\frac{\mu_e Q_п}{Q_и - Q_п} + \mu} = \int_0^T \frac{dt}{V_0},$$

откуда

$$\frac{1}{Q_и - Q_п} \ln \frac{\frac{\mu_e Q_п}{Q_и - Q_п} + \mu_2}{\frac{\mu_e Q_п}{Q_и - Q_п} + \mu_1} = \frac{T}{V_0}.$$

Производя преобразования, находим окончательно

$$\mu_2 = \left(\frac{\mu_e П}{И - П} + \mu_1 \right) e^{\frac{И - П}{V_0}} - \frac{\mu_e П}{И - П}. \qquad (99)$$

Если в формуле (99) $И = 0$, то будем иметь

$$\mu_2 = \mu_e + \frac{\mu_1 - \mu_e}{e^{\frac{П}{V_0}}}. \qquad (100)$$

В формуле (100) при $П = 0$ $\mu_2 = \mu_1$, при $П = \infty$ $\mu_2 = \mu_e$.

Приведенные выводы подтверждаются натурными наблюдениями, согласно которым при маловодном половодье минерализация водохранилища почти не отличается от минерализации до паводка, а при многоводном половодье приближается к минерализации притока.

Таким образом, весной для водохранилища фактически всегда соблюдается неравенство

$$\mu_1 > \mu_2 > \mu_c.$$

Если заполнение водохранилища заканчивается и сброс происходит где-то в середине расчетного отрезка времени T, то последний разделяется на две части: x и $1-x$. В течение первой части (x) происходит наполнение водохранилища, концентрация определяется по формуле (94) и является начальной для второй части. С момента заполнения расчет ведется по формуле (99). При этом та доля сезона, которая приходится на наполнение водоема, легко может быть определена из следующей зависимости:

$$П-(З+Ф+И)x=Д,$$

откуда

$$x=\frac{Д}{П-(З+Ф+И)}. \qquad (101)$$

Здесь $Д$ — объем, необходимый для заполнения от емкости в начале сезона до V_0.

В той части сезона xT, в течение которой происходит заполнение водохранилища, приток, водопотребление (забор воды), фильтрация и испарение принимаются пропорциональными величине x, т. е. $xП$, $xЗ$ и $xИ$, а на период сброса переносится остаток их.

Пример. К началу весны для заполнения водоема до НПГ недостает 6 млн. м³; приток за весну $П=15$ млн. м³, водопотребление $З=4$ млн. м³, фильтрация $Ф=1$ млн. м³, испарение $И=0{,}4$ млн. м³.

По формуле (101)

$$x=\frac{6}{15-(4+1+0{,}4)}=0{,}62.$$

При этом компоненты водного баланса распределяются согласно табл. 86.

Таблица 86

Компоненты водного баланса для весны

Интервал времени	%	Объем, млн. м³			
		приток	водопотребление	фильтрация	испарение
1	62	9,3	2,48	0,62	0,25
2	38	5,7	1,52	0,38	0,15

Упрощенные зависимости для непосредственного определения минерализации за отрезок времени T на основании водно-солевого баланса для того же отрезка имеют вид:

1) для работы водохранилища без сбросов

$$G=\mu_e П+\mu_1 V_1=\frac{\mu_1+\mu_2}{2}(З+Ф)+\mu_2 V_2,$$

откуда

$$\mu_2=\frac{2G-\mu_1(З+Ф)}{З+Ф+2V_2}; \qquad (102)$$

2) для работы водохранилища со сбросами

$$G=\mu_e П+\mu_1 V_0=\mu_2 V_0+\frac{\mu_1+\mu_2}{2}(З+Ф+С),$$

откуда

$$\mu_2=\frac{2G-\mu_1(З+Ф+С)}{З+Ф+С+2V_0}, \qquad (103)$$

где G — общий вес солей, содержащихся в водохранилище к началу сезона $\mu_1 V_1$ и в притоке за сезон $g=\mu_e П$, т. е. $G=\mu_1 V_1+g$; $П$ — приток воды за интервал с однообразным режимом водохранилища; V_2 — объем водохранилища к концу сезона; $С$ — объем сброса воды через водослив; остальные обозначения прежние.

Формулы (102) и (103) дают результаты, наиболее близкие к таковым по формулам (94) и (99), и широко используются для расчета минерализации при регулировании стока. При больших интервалах или большом превышении объема притока за сезон над объемом водохранилища в начале его возможны существенные отклонения результатов, полученных по упрощенным формулам (102) и (103), от величин, полученных по формулам (94) и (99). При этом расчет следует вести по формулам (94) и (99) или по формулам (102) и (103), но с делением года на большее число интервалов.

Формулы (94) и (99) или (102) и (103) применимы для расчета не только минерализации, но и отдельных ингредиентов, если последние рассчитываются не по связи $J=\varphi(\mu)$, а самостоятельно.

Надо отметить, что аналитический метод гидрохимических расчетов позволяет выбирать основные характеристики (мертвый объем, коэффициент регулирования стока и т. п.) с вполне конкретным количественным определением гидрохимических показателей водоема.

Нет оснований считать, что возможное взаимодействие между ионами в водохранилище существенно отлично от такового для речного стока в естественном состоянии, так как минерализация регулирующих водохранилищ обычно не превышает концентрацию солей питающего их летом и зимой наиболее минерализованного речного стока и всегда очень далека от насыщения раствора. Поэтому аналитический метод, по-видимому, не может приводить к существенным отклонениям от природы гидрохимических явлений.

Во всяком случае, если не учитывать тех или иных потерь солей из раствора на ассимиляцию их водной растительностью или при распаде бикарбонатов (при отсутствии возможности такого учета), аналитический метод дает некоторый запас осторожности в расчетах. Вместе с тем по этому методу на данном этапе развития гидрохимии можно получить вполне достаточную техническую характеристику водохранилищ в соответствии с инженерной практикой и народнохозяйственными требованиями.

Изложенные основы гидрохимических расчетов дают возможность выполнить качественный анализ водохозяйственного режима (§ 41) и наметить соответствующие мероприятия по упорядочению водопользования и сброса промышленных сточных вод (§ 42), что улучшает обеспечение потребностей в воде в условиях маловодных районов с развитой промышленностью.

§ 41. РАСЧЕТЫ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ В ВОДОЕМАХ ГРЭС И МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЕЕ ИЗМЕНЕНИЮ

Последовательность расчета (прогноза) минерализации воды в водохранилищах и прудах-охладителях тепловых электростанций

В проектах водохранилищ-регуляторов и прудов-охладителей необходимо выполнять расчет общей минерализации, т. е. суммы ионов, и солевого (ионного) состава воды пруда или водохранилища. Для этого расчета должны быть накоплены химические анализы проб воды, достаточно подробно освещающие все фазы стока за период не менее одного годового цикла. Во всяком случае необходимо иметь не менее 7—10 анализов, распределенных достаточно равномерно по всему половодью (на подъеме, гребне и спаде), и 15—20 анализов, равномерно освещающих остальные фазы годового стока (летнюю межень, осеннее повышение стока, зимний режим).

Каждый анализ воды включает по возможности определения (в мг/л или мг-экв/л): 1) взвешенных веществ при 105°; 2) сухого остатка при 110°; 3) минерального остатка (т. е. сухого остатка после прокаливания); 4) органических веществ (даются как разность между определениями 2 и 3); 5) окисляемости по O_2 или $KMnO_4$; 6) кальция (Ca^{2+} или CaO), причем $Ca^{2+}=0{,}715$ CaO; 7) магния (Mg^{3+} или MgO), причем $Mg^{2+}=0{,}604$ MgO; 8) натрия (Na); 9) хлоридов (Cl^-); 10) сульфатов (SO_4^{2-}); 11) карбонатов (CO_3^{2-}); 12) силикатов (SiO_3^{2-} или SiO_2); 13) сульфатного остатка; 14) жесткости общей ($H_{общ}$); 15) жесткости карбонатной ($H_к$); 16) жесткости постоянной ($H_п$) — разности между определениями 14 и 15.

За половодье желательно определять средневзвешенную минерализацию $\mu_{ср}$, если имеются анализы в различные даты половодья. При этом весь гидрограф высоких вод разбивается вертикалями, проходящими по середине интервалов между упомянутыми датами,

на площадки — объемы, относящиеся к соответствующим величинам μ_i (по анализам). В результате

$$\mu_{ср}=\frac{\mu_1 V_1+\mu_2 V_2+\ldots+\mu_n V_n}{V_1+V_2+\ldots+V_n}. \qquad (104)$$

Здесь в знаменателе сумма частных объемов есть объем всего половодья (или вся площадь гидрографа высоких вод).

Учет притока ионов в водохранилище производится по схеме, составленной на основе рассмотрения химических анализов и соответствующих им расходов воды в реке (Q). В результате минерализация притока воды $\mu_в$ должна быть выражена в виде осредненного графика $\mu_в=\varphi(Q)$. Если же в пределах одной и той же фазы стока (например, половодье или летняя межень) минерализация независимо от колебания расходов за фазу остается практически постоянной (мало изменяется), то в таких случаях вместо упомянутого графика можно назначить постоянные сезонные величины минерализации приточной воды для фазово-однородных по стоку сезонов, например: для весны $\mu_в=400$ мг/л, для лета $\mu_в=800$ мг/л и т. д. Возможны также комбинированные случаи, когда графическая связь между $\mu_в$ и Q устанавливается отдельно для каждого сезона.

Пользуясь выбранной схемой учета притока ионов, количество их, поступающее в водохранилище за сезон, определяется по формуле (в кг)

$$g=\mu_в QT=\mu_в П, \qquad (105)$$

где $\mu_в$ — среднесезонная минерализация речной воды (кг/м³), соответствующая данному сезону длительностью T с или среднесезонному притоку (Q м³/с); $П$ — объем притока за сезон, м³. Среднесезонный приток воды в водохранилище Q м³/с и длительность сезона T с принимаются по данным водохозяйственных расчетов, которые должны быть выполнены как для среднего года, так и для маловодного периода.

Аналогично этому расчеты минерализации могут быть выполнены по месяцам, но при этом и водохозяйственные расчеты также должны быть приурочены к месячным интервалам.

Расчет минерализации воды при работе водохранилища производится по формуле (94), (97) или (102) для сезонов работы водохранилища без сбросов и по формуле (99) или (103) для сезонов со сбросами. В этих формулах водозабор учитывается в буквальном смысле, т. е. имеется в виду безвозвратно забираемая вода вместе с солями. Общее испарение $И$ (естественное и от подогрева оборотной воды на ГРЭС) в формулы (102) и (103) непосредственно не входит. Оно учитывается в величинах V_2 и $С$. Величины $З$, $Ф$, $С$, V_1, V_2, V_0 принимаются по данным водохозяйственных расчетов в м³; $\mu_в$, μ_1, μ_2 — в кг/м³; $G=\mu_1 V_1+g$ — в кг (см. § 40).

Минерализация воды к концу сезона μ_2 является начальной для следующего сезона, причем расчет выполняется по форме табл. 87. В этой таблице показана схема расчета по формулам (102) и (103)

Расчет (прогноз) минерализации воды водохранилища ГРЭС, выполняю

Сезон года	Объем водохранилища к началу сезона V_1 млн. м³	Минерализация воды водохранилища μ_1 мг/л	Количество солей в водохранилище к началу сезона $\mu_1 V_1$ млн. кг	Естественный приток в водохранилище за сезон		
				воды $П$ млн. м³	минерализация μ_e мг/л	солей g млн. кг
Средний						
Лето 1-е (V—VI)	20,51	650	13,30	2,18	600	1,31
Лето 2-е (VII—IX)	20,23	686	13,84	1,46	750	1,10
Осень (X—XI)	18,10	760	13,75	1,09	900	0,98
Зима (XII—II)	17,46	796	13,88	2,55	700	1,78
Весна (III—IV)	18,01	798	14,35	3,00	400	1,20
	20,51	747	15,30	7,90		3,16
Расчетный маловод						
Первый						
Лето 1-е (V—VI)	20,51	650	13,30	0,96	850	0,82
Лето 2-е (VII—IX)	19,13	699	13,36	0,64	1100	0,70
Осень (X—XI)	15,79	814	12,84	0,48	1200	0,58
Зима (XII—II)	14,64	859	12,57	1,12	1050	1,18
Весна (III—IV)	13,90	898	12,48	4,78	500	3,39
Второй						
Лето 1-е (V—VI)	17,10	870	14,87	0,96	850	0,82
Лето 2-е (VII—IX)	15,91	927	14,77	0,64	1100	0,70
Осень (X—XI)	12,97	1080	14,00	0,48	1200	0,58
Зима (XII—II)	11,94	1135	13,55	1,12	1050	1,18
Весна (III—IV)	11,32	1166	13,20	4,78	500	3,39
Межень треть						
Лето 1-е (V—VI)	14,62	941	15,73	0,96	850	0,82
Лето 2-е (VII—IX)	13,59	1146	15,57	0,64	1100	0,70
Осень (X—XI)	10,99	1309	14,40	0,48	1200	0,58
Зима (XII—II)	10,05	1379	13,85	1,12	1050	1,18

Примечание. 1. Изменения минерализации за период наполнения и при
2. Приток солей учтен по зависимости $\mu_e = \varphi(Q)$.

Таблица 87

щего регулирование стока и охлаждение воды (V_0=20,51 млн. м³)

Суммарное количество		Фильтрация воды из водохранилища Φ млн. м³	Естественное плюс дополнительное испарение H млн. м³	Водопотребление на ГРЭС $З$ млн. м³	Объем водохранилища к концу сезона V_2 млн. м³	Минерализация к концу сезона μ_2 мг/л	Сброс воды C млн. м³
воды млн. м³	солей G млн. кг						
год							
22,69	14,61	0,51	0,71+0,60	0,64	20,23	686	—
21,69	14,94	0,72	1,03+0,89	0,95	18,10	760	—
19,19	14,73	0,44	0,20+0,46	0,63	17,46	796	—
20,01	15,66	0,66	0,40	0,94	18,01	798	—
21,01	15,55	0,14	0,06+0,13	0,17	20,51	747	—
28,41	18,46	0,37	0,18+0,33	0,46	20,51	650	6,56
ный период (P=97%)							
год							
21,47	14,12	0,48	0,62+0,60	0,64	19,13	699	—
19,77	14,06	0,66	1,48+0,89	0,95	15,79	814	—
16,27	13,42	0,38	0,16+0,46	0,63	14,64	859	—
15,76	13,75	0,52	0,40	0,94	13,90	898	—
18,68	15,87	0,37	0,12+0,46	0,63	17,10	870	—
год							
18,06	15,69	0,40	0,51+0,60	0,64	15,91	927	—
16,55	15,47	0,52	1,22+0,89	0,95	12,97	1080	—
13,45	14,58	0,29	0,13+0,46	0,63	11,94	1135	—
13,06	14,73	0,40	0,40	0,94	11,32	1166	—
16,10	16,69	0,29	0,10+0,46	0,63	14,62	941	—
его года							
15,58	16,55	0,32	0,43+0,60	0,64	13,59	1146	—
14,23	16,27	0,41	0,99+0,89	0,95	10,99	1309	—
11,47	14,98	0,23	0,10+0,46	0,63	10,05	1379	—
11,17	15,03	0,31	0,40	0,94	9,52	1396	—

формировании установившегося солевого режима не показаны.

для водохранилища, совмещающего функции регулирования стока и охлаждения воды (учитывается дополнительное испарение от подогрева воды).

Расчеты минерализации выполняются для средних и маловодных лет. По гидрологическим и водохозяйственным данным средних по водности лет можно получить гидрохимические показатели для периодов;

а) наполнения водохранилища;

б) формирования установившегося водно-солевого баланса водохранилища после его наполнения (т. е. от этого момента до того времени, когда, например, к концу весны концентрация ионов в водохранилище будет такой же, как и к концу весны предыдущего года).

Установившиеся показатели водно-солевого баланса в пределах года принимаются в качестве гидрохимической характеристики водохранилища для средних лет. При этом расчеты производятся по ряду средних лет, в связи с тем что при многолетнем регулировании влияние многоводных и маловодных лет на минерализацию водоема взаимокомпенсируется. Кроме того, средние годы являются близкими к наиболее вероятному. Получаемые таким образом гидрохимические характеристики водохранилища являются однозначными, поэтому они могут быть использованы как показатели для гидрохимического сравнения водоемов.

В случае необходимости расчет минерализации при наполнении водохранилища может быть произведен и по данным маловодного периода, но показатели установившегося солевого режима определяются обязательно по ряду средних лет. Эти же показатели принимаются исходными для начала расчетного маловодного периода (к освещению хода минерализации в тот же период). При необходимости наряду с общей минерализацией определяется также ионный состав воды в водохранилище. Состав ионов многолетне регулируемого стока исчисляется непосредственно по найденной минерализации и по соотношению между концентрациями ионов (в мг/л или мг-экв/л) в естественной речной воде (по данным химических анализов). При этом ионный состав речной воды учитывается в средневзвешенных процентах по объемам сезонного стока, согласно схеме, показанной в табл. 88.

По найденным средневзвешенным процентам распределяется общая прогнозируемая минерализация и, таким образом, устанавливается прогнозируемый солевой состав зарегулированного стока.

Концентрацию ионов каждого ингредиента J можно найти также по формулам, принятым для прогноза суммы ионов, или по прогнозируемой минерализации, но с использованием осредненных связей $J=\varphi(\mu_e)$, устанавливаемых по естественному стоку реки.

Жесткость H в немецких градусах может быть получена по установленным ингредиентам по формулам:

для общей жесткости

$$H^{\circ}_{\text{общ}}=0{,}14Ca^{2+}+0{,}231Mg^{2+}=0{,}1CaO+0{,}139MgO, \qquad (106)$$

Таблица 88

Схема расчета ионного состава воды в водохранилище

Ионы, %	Распределение притока, %				Средневзвешенное за год распределение суммы ионов, %
	75	5	10	10	
	весна	лето	осень	зима	
Cl^-	25	20	30	20	24,8
SO_4^{2-}	40	30	35	45	39,5
HCO_3^-	10	20	15	10	11,0
Ca^{2+}	10	15	10	15	
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Сумма	100	100	100	100	100

для временной (карбонатной) жесткости

$$H_к^\circ = 0{,}0935CO_3^{2-} = 0{,}046HCO_3^-, \qquad (107)$$

где Ca^{2+}, Mg^{2+}, CaO, MgO, CO_3^{2-} и HCO_3^- — в мг/л.

Если полученные величины жесткости разделить на 2,8, то размерность для нее будет не в немецких градусах, а в мг-экв/л.

Жесткость можно найти и по установленной (прогнозируемой) минерализации, используя, аналогично изложенному выше, зависимость для естественного стока $H_{общ} = \varphi(\mu_e)$.

Если регулирование стока выполняется водохранилищем, а охлаждение оборотной воды отдельным прудом-охладителем, то водохозяйственные и гидрохимические расчеты выполняются отдельно по каждому водоему. Понятно, что по водохранилищу при этом учитывается только естественное испарение, по пруду-охладителю — естественное и дополнительное испарение, а также попуски из водохранилища-регулятора для промывки («продувки») пруда. В таком случае концентрация ионов в воде пруда-охладителя при длительных попусках из водохранилища-регулятора (в течение одного-двух месяцев) определяется, например, по формуле (102) при пополнении пруда и по формуле (103) при переливе воды через водослив пруда (при продувке). При этом в указанных формулах величина G будет означать общий вес солей в пруде и в объеме $П$, равном попуску [1] для пруда из верхнего водохранилища $П'$ и притоку с собственного водосбора $П''$. Все остальные обозначения относятся только к пруду.

При непродолжительных сроках попуска в пруд, в течение которых забором воды, испарением и фильтрацией из пруда можно пренебречь, минерализация воды в пруде определяется:

[1] Строго говоря, при этом вместо $П'$ следует брать $П' - a'$, где a' — безвозвратные фильтрационные потери из реки от водохранилища до пруда. Однако большей частью величиной a' пренебрегают.

а) при пополнении пруда — по обычной формуле смешения, вытекающей из соотношения (102),

$$\mu_2 = \frac{\mu_1 V_1 + \mu_п П}{V_1 + П}; \qquad (108)$$

б) при попусках с переливом воды через водослив пруда (при продувках) — по формуле (103) при значениях $И$, $З$, $Ф$, близких к нулю, или, более точно, по уравнению

$$\mu_2 = \mu_п + \frac{\mu_1 - \mu_п}{e^{\frac{П}{V_0}}}. \qquad (109)$$

Здесь $\mu_п$ — осредненная минерализация воды попуска из водохранилища-регулятора $\mu_п'$ и притока с собственного водосбора пруда $\mu_е$ (при незначительном собственном притоке за период кратковременного попуска солевую концентрацию этой смеси $\mu_п$ можно приравнять к концентрации попуска); $П = П' + П''$ — объем попуска для пруда $П'$ и притока с собственного водосбора $П''$ (приток в период попусков обычно близок к нулю). Остальные обозначения прежние и относятся только к пруду.

Если из верхнего водохранилища в течение довольно длительного времени (два-три месяца и более) производятся попуски, достаточные для восполнения потерь из пруда (без его продувки), то повышение минерализации в пруде имеет своим пределом величину, определяемую по формуле (90).

Если при этом минерализация воды в пруде становится больше величины $\mu_д$, допустимой для системы подготовки воды, типа котлов и конденсаторов на ГРЭС, то производится слив воды из пруда с одновременной заменой ее попусками из вышележащего водохранилища-регулятора, т. е. выполняется продувка пруда. Продувка целесообразна в течение маловодной части года, когда отсутствует перелив естественного стока через водослив пруда и потому не происходит необходимой смены водных масс.

Продувка за время низкого стока в году при одном и том же объеме сливаемой воды бывает периодической и непрерывной. Последняя считается более рациональной. Количество воды, сливаемое при этом из пруда и восполняемое из водохранилища-регулятора, определяется по аналогии с формулой (90) по выражению

$$C = \frac{k\mu_п И}{\mu_д - \mu_п} - (З + Ф). \qquad (110)$$

Величина попуска для пруда равна

$$П' = C + З + Ф + И + a - П''. \qquad (111)$$

В этих формулах a — потери воды из русла на участке от водохранилища-регулятора до пруда-охладителя (обычно $a \approx 0$); $k \geqslant \geqslant 1{,}0$ — коэффициент, учитывающий полноту перемешивания попусков с водой пруда, что зависит от его конфигурации и располо-

жения водозабора. Для вытянутых узких прудов с водозабором у плотины $k \approx 1{,}0$. Остальные обозначения прежние. Все элементы, входящие в формулу (111), относятся к периоду попуска.

Слив нецелесообразен при условиях, когда минерализация воды попуска из выше лежащего водохранилища-регулятора $\mu'_{п}$ равна или более $\mu_{д}$ [формула (110) действительна только для соотношений $\mu_{п} < \mu_{д}$, а значит, и для $\mu'_{п} < \mu_{д}$, поскольку в период попуска величина $П''$ незначительна]. Однако и при $\mu_{п} < \mu_{д}$ возможны случаи, когда слив $С$ по формуле (110) имеет отрицательное значение. Это показывает, что в подобных случаях слив также не требуется, так как сумма величин $З + Ф$, выполняющих роль продувки, достаточна для удержания максимальной минерализации, по формуле (90), на уровне $\mu_{пр} \leqslant \mu_{д}$.

Расчеты изложены ниже.

Расчеты сброса-подпитки водоемов-охладителей для их опреснения

Восполнение потерь воды в водоемах-охладителях ГРЭС и других предприятий с оборотным водоснабжением теплообменников обычно производится из ближайших рек — источников подпитки, имеющих необходимый дебит воды, достаточно мягкой, не вызывающей накипи в теплообменниках.

Однако количество или качество речной воды обычно не удовлетворяют потребностей подпитки в период межени. Поэтому потери воды и повышение ее жесткости в водоеме-охладителе продолжаются в течение всей межени, а наполнение его при одновременном опреснении производится довольно быстро во время половодья, при больших расходах мягкой талой воды. Такие ежегодные циклические сработки и наполнения водоема с его опреснением характерны случайными величинами весенней подпитки и опреснения.

Используя цикличность упомянутого процесса, при эксплуатации водоема можно получать не случайные результаты по объему подпитки и качеству воды, а с приближением к необходимым величинам по расчету. При этом сработка и наполнение будут определяться с учетом качества воды в реке и в водоеме. Однажды созданная к началу межени расчетная или близкая к ней минерализация воды в водоеме, поддерживаемая режимом эксплуатации, будет повторяться из года в год.

По анализам проб воды, забираемой из водоема, можно построить зависимость карбонатной жесткости g от общей минерализации μ, т. е. $g = f(\mu)$ [87]. Задавая предельную величину жесткости воды $g_{пр}$, не дающей отложений в теплообменниках, можно по упомянутой зависимости найти соответствующую величину $\mu_{пр}$ или определить $g_{пр}$, зная $\mu_{пр}$.

Минерализация воды в водоеме за период межени повышается на величину $\Delta\mu$, которую находят по эксплуатационным данным

за предыдущие годы или из расчетов водно-солевого баланса. Величины μ_1 и g_1 в конце половодья, соответствующие объему водохранилища V_0 при нормальном подпорном горизонте для соблюдения безнакипного режима в течение всей межени не должны превышать

$$\mu_1=\mu_{пр}-\Delta\mu \quad \text{или} \quad g_1=g_{пр}-\Delta g. \tag{112}$$

Чтобы получить такие показатели, сбрасывают соответствующее количество воды перед началом половодья с последующим заполнением водоема до НПГ талым стоком извне.

Величина необходимого предполоводного сброса C для получения заданной к концу половодья минерализации μ_1 или значение $\mu'_1(g'_1)$ при допустимом сбросе определяются расчетом.

Пусть V_2, μ_2, g_2 — наличный объем водохранилища, минерализация и жесткость воды в нем перед половодьем, к концу межени (μ_2 принимается равной $\mu_{пр}$); V_P, μ_P — обеспеченный расчетный или прогнозный приток талой воды с собственного водосбора и ее минерализация; $V_п$, $\mu_п$, $g_п$ — объем, минерализация и жесткость воды, подаваемой из внешнего источника за время половодья (подпитка водоема с заполнением его до НПГ, т. е. до V_0); $V_с = V_ф + V_з$ — объем воды, уходящей с солями ($V_с$) на фильтрацию ($V_ф$) и безвозвратное водопотребление из водохранилища за время от начала предполоводного сброса до окончания подпитки из внешнего источника ($V_з$); $Q_ц$, $Q_с$, $Q_и$ — расходы воды: циркуляционной, безвозвратно уходящей вместе с солями (безвозвратный забор воды, фильтрация и т. п.) и испаряемой; $Ф$, $З$, $И_е$, $И_д$ — объемы воды, уходящей на фильтрацию, водопотребление, испарение естественное ($И_е$) и дополнительное, от подогрева воды на предприятии ($И_д$) за всю межень; эти величины принимаются по заданию или определяются расчетом.

Емкость водоема к концу межени будет

$$V_2=V_0-(З+Ф+И_е+И_д). \tag{113}$$

Элементы правой части уравнения заданы или определяются по расчету ($И_е$ — для всей площади водоема, $И_д$ — для активной зоны).

Величина μ_1 принимается (или задается) такой, чтобы с учетом накопления в водоеме солей за время до следующего половодья концентрация их к концу межени не превосходила допустимой μ_2 ($\mu_{пр}$), которая с начальной минерализацией μ_1 и другими показателями связана уравнением (102).

Значение μ_1 контролируется соотношением (112) по установленным или по фактическим данным для $\mu_2=\mu_{пр}$ и $\Delta\mu$.

Однако, принимая значение V_2 по формуле (113), не всегда можно создать в водоеме концентрацию солей к концу весны такой, которая равна μ_1 по формуле (102). Это зависит как от V_2 и μ_2, так и от объема и минерализации подпиточной воды для восполнения водохранилища от V_2 до V_0.

Нередко возникает потребность в дополнительных сбросах с последующей увеличенной опресняющей подпиткой.

Для получения реального значения μ_1 при V_0 напишем уравнение водно-солевого баланса за время от начала до конца половодья:

$$V_2\mu_2 - C\mu_2 - (V_\Phi + V_3)\,[0{,}5\,(\mu_2 + \mu_1)] + V_P\mu_P + V_\Pi\mu_\Pi = V_0\mu_1, \quad (114)$$

где объем подпитки равен

$$V_\Pi = V_0 - V_2 + C + (V_\Phi + V_3) - V_P. \quad (115)$$

Подставляя значение V_Π из (115) в (114), найдем

$$C = V_2 - \frac{V_0\,(\mu_1 - \mu_\Pi) + (V_\Phi + V_3)\,[0{,}5\,(\mu_1 + \mu_2) - \mu_\Pi] - V_P\,(\mu_P - \mu_\Pi)}{\mu_2 - \mu_\Pi}. \quad (116)$$

Имея в виду непродолжительность подпитки водоема во время половодья, величиной $V_\Phi + V_3$ можно для упрощения пренебречь. Тогда

$$C = V_2 - \frac{V_0\,(\mu_1 - \mu_\Pi) - V_P\,(\mu_P - \mu_\Pi)}{\mu_2 - \mu_\Pi}. \quad (117)$$

Как видно из (117), объем предполоводного сброса C зависит от целого ряда причин, в том числе и от μ_1, которая является заданной или определяется по формуле (102).

В связи с этим в некоторых случаях величина C по уравнению (117) приобретает недопустимые значения.

Понятно, что сброс воды по гидрохимическим условиям допускается, если только $g_2 > g_\Pi$. При достаточно благоприятных обстоятельствах сброс воды следует исключить, сокращая тем самым объем перекачки воды из внешнего источника.

Выгодность сброса можно оценить и по экономическим показателям, сопоставляя затраты на водоподготовку и стоимость перекачки из реки объема сброшенной воды.

Во всяком случае объем C, получаемый из уравнения (117), необходимо контролировать:

а) по условиям гарантированного отбора воды V_Π в половодье из внешнего источника, согласно уравнению (115);

б) по техническим условиям эксплуатации водохранилища [ограниченность располагаемого резерва полезной емкости и той части мертвого объема, которая может быть использована (§ 29), обнажение всасывающих труб и т. п.].

Величина сброса, полученная по установленным исходным данным (μ_1 и т. п.) и удовлетворяющая указанным двум условиям, считается приемлемой. В противном случае следует назначить допустимый сброс в соответствии с этими условиями.

При этом объем подпитки находится также по уравнению (115), а минерализация воды в водоеме в конце заполнения (при НПГ) будет равна

$$\mu_1' = \frac{(V_2 - C)\mu_2 + V_P\mu_P + (V_0 - V_2 - V_P + C)\mu_п}{V_0}. \qquad (118)$$

В таком случае за счет сброса минерализация может быть снижена на величину от μ_2 до μ_1' (или жесткость — от g_2 до g_1'), а остающаяся часть необходимого снижения (от g_1' до g_1) нейтрализуется путем умягчения воды, подаваемой на охлаждение.

Рассмотрим ход процесса изменения жесткости при непрерывном умягчении оборотного расхода воды.

Допустим, что в оборотном охлаждающем расходе $Q_ц$ с переменной жесткостью g в результате умягчения непрерывно удаляется k-тая часть наличных на данный момент солей карбонатной жесткости (k — коэффициент умягчения, например, $k=0{,}1$).

В условиях ветрового воздействия и непрерывной циркуляции воды при длительном течении процесса (например, 10—20 суток) в водохранилище достигается перемешивание, близкое к полному (по концентрации солей), и все частицы воды проходят через водозабор. Тогда изменение жесткости при изменении объема водохранилища можно представить так:

$$-Q_c g\,dt - kQ_ц g\,dt = d(Vg). \qquad (119)$$

Знак минус поставлен в связи с тем, что общее количество растворенных солей жесткости в системе с течением времени уменьшается (отрицательное приращение количества солей).

Для каждого момента имеем:

$$V = V_c - (Q_и + Q_c)\,t, \qquad (120)$$

$$dV = -(Q_и + Q_c)\,dt. \qquad (121)$$

Подставляя значения V и dV из формул (120) и (121) в выражение (119), находим

$$Q_и g\,dt - kQ_ц g\,dt = [V_0 + (Q_и + Q_c)\,t]\,dg.$$

Разделяя переменные и переходя к интегрированию, имеем

$$-\int_0^T \frac{(Q_и - kQ_ц)\,dt}{(Q_и + Q_c)\,t - V_0} = \int_{g_1'}^{g_1} \frac{dg}{g},$$

откуда

$$T = \frac{V_0}{Q_и + Q_c}\left[1 - \left(\frac{g_1}{g_1'}\right)^{\frac{Q_и + Q_c}{kQ_ц - Q_и}}\right]. \qquad (122)$$

По уравнению (122) нетрудно найти время, в течение которого жесткость воды в водохранилище уменьшится с g_1' до g_1, т. е. можно проследить ход изменения жесткости во времени.

В дальнейшем, в течение межени, жесткость подаваемой на предприятие охлаждающей воды периодически контролируется химическими анализами и при необходимости вода доумягчается, так как фактические величины испарения и другие условия могут отклоняться от принятых для расчета.

Пример. Полная емкость водохранилища после завершения подпитки в половодье (т. е. при НПГ) $V_0=58$ млн. м³, площадь зеркала 13 км² и минерализация воды $\mu_1=600$ мг/л (или 0,6 кг/м³), чему соответствует карбонатная жесткость $g_1=3{,}0$ мг-экв/л. Поверхностный и грунтовый приток в водохранилище отсутствует. В течение межени подпитка водоема не производится, безвозвратный забор воды из него в это время равен $З=1{,}4$ млн. м³, а фильтрация — 6% от среднего объема водохранилища за межень, что составляет (после повторного уточнения конечного объема) $Ф=2{,}7$ млн. м³.

Сброс тепла с охлаждающей водой за шесть теплых месяцев межени равен

$$0{,}75 \cdot 80 \cdot 9 \cdot 6 \cdot 2{,}63 \cdot 10^6 = 8500 \cdot 10^6 \text{ ткал};$$

сброс тепла за пять холодных месяцев межени

$$0{,}75 \cdot 55 \cdot 12 \cdot 5 \cdot 2{,}63 \cdot 10^6 = 6500 \cdot 10^6 \text{ ткал},$$

где 0,75 — коэффициент использования установленной мощности предприятия (использование ее в течение 6600 ч в год); 80; 55 — летний и зимний расходы охлаждающей воды, м³/с; 9; 12 — подогрев воды в теплообменниках летом и зимой, градусов. Видимое естественное испарение (испарение с водной поверхности минус осадки) за 11 месяцев межени составляет $E=0{,}45$ м.

Требуется определить приращение минерализации воды в водоеме-охладителе за межень $\Delta\mu$ и объем весеннего водообмена для ликвидации этого приращения.

Из-за отсутствия данных для подсчета потерь воды от подогрева при рассеянии тепла по формуле (69) приближенно принято, что испарением рассеивается летом 75% тепла, зимой — 55% (см. § 26). При этом с испарением воды уходит тепла: в теплое время $0{,}75 \cdot 8500 \cdot 10^6 = 6380 \cdot 10^6$ ткал при испарении воды $6380 \cdot 10^6 : 580 = 11 \cdot 10^6$ м³, в холодное время $0{,}55 \cdot 6500 \cdot 10^6$ ткал при испарении воды $3570 \cdot 10^6 : 592 = 6{,}0 \cdot 10^6$ м³. При этом $И_д = 11 + 6 = 17 \cdot 10^6$ м³.

Здесь 580 и 592 — скрытая теплота испарения (кал/г) при 30 и 10° С.

На естественное испарение расходуется за всю межень

$$И_е = EF = 0{,}45 \cdot 12 \cdot 10^6 = 5{,}4 \cdot 10^6 \text{ м}^3,$$

где 12 — средняя за межень площадь зеркала водоема (после повторного уточнения всех потерь), км².

В результате полный отъем воды за межень равен $(17{,}0+5{,}4+2{,}7+1{,}4)\cdot 10^6=26{,}5\cdot 10^6$ м³, причем объем к концу межени снизится до $V_2=(58-26{,}5)\cdot 10^6$ м³$=31{,}5\cdot 10^6$ м³, чему соответствует площадь зеркала 11 км².

Минерализация μ_2 к концу межени по формуле (102) равна

$$\mu_2=\frac{2\cdot 0{,}6\cdot 58\cdot 10^6-0{,}6\,(2{,}7+1{,}4)\cdot 10^6}{(2{,}7+1{,}4+2\cdot 31{,}5)\cdot 10^6}=1{,}0 \text{ кг/м}^3,$$

чему соответствует карбонатная жесткость $g_2=5{,}0$ мг-экв/л.

Повышение концентрации солей в воде от половодья до следующего половодья составит по минерализации $\Delta\mu=1000-600=400$ мг/л, по карбонатной жесткости $\Delta g=5{,}0-3{,}0=2{,}0$ мг-экв/л.

Пусть допустимая жесткость воды в водохранилище к концу межени $g_{пр}=5{,}0$ мг-экв/л, жесткость воды подпитки в половодье $g_п=2{,}5$ мг-экв/л. Требуется определить объем предполоводного сброса из водоема, необходимый для того, чтобы в конце заполнения в половодье жесткость не превышала $g_1=5{,}0-2{,}0=3{,}0$ мг-экв/л.

По формуле (117)

$$C=31{,}5\cdot 10^6-\frac{58\cdot 10^6\,(3{,}0-2{,}5)}{5-2{,}5}=20{,}0\cdot 10^6 \text{ м}^3,$$

что по условиям работы установки неприемлемо.

Судя по технически допустимому снижению уровня при сбросе, из водохранилища можно выпустить перед половодьем только $8{,}4\cdot 10^6$ м³. При этом аналогично расчету по формуле (118), жесткость к концу весеннего заполнения определится по равенству

$$g_1'=\frac{(31{,}5-8{,}4)\cdot 10^6\cdot 5+(58-31{,}5+8{,}4)\cdot 10^6\cdot 2{,}5}{58\cdot 10^6}=3{,}5 \text{ мг-экв/л}.$$

Для соблюдения безнакипного режима работы теплообменников необходимо снизить жесткость воды на величину $g_1'-g_1$, что достигается доумягчением воды, например негашеной известью (CaO).

Количество R чистой (100%-ной) окиси кальция, требуемое для умягчения воды, определяется по следующей приближенной формуле (Перельман В. И. Краткий справочник химика. М., Госхимиздат, 1963):

$$R\text{CaO}=28g+1{,}3\text{CO}_2+1{,}4\text{MgO} \text{ мг/л}, \qquad (123)$$

где g — нейтрализуемая карбонатная жесткость, мг-экв/л; CO_2 и MgO — найденные при анализе воды водоема количества CO_2 и MgO, мг/л.

Для безнакипного режима до конца межени жесткость в начале ее (сразу после половодья), согласно изложенному, должна быть равна $5{,}0-2{,}0=3{,}0$ мг-экв/л. Снижение на 1,5 мг-экв/л (с 5 до 3,5) достигнуто за счет сброса и восполнения. Необходимое доумягчение воды после половодья равно $3{,}5-3{,}0=0{,}5$ мг-экв/л.

Подставляя эту величину в формулу (123) и принимая в ней осредненные для начала межени величины CO_2 и MgO соответственно равными 4 и 7 мг/л, найдем $RCaO = 28 \cdot 0{,}5 + 1{,}3 \cdot 4 + 1{,}4 \times \times 7 = 29{,}0$ мг/л $= 0{,}029$ кг/м³. Количество реагента следует вычислять не по расходу охлаждающей воды, а по общей емкости водохранилища (за межень она перекачивается 15—20 раз и более). На дополнительную водоподготовку необходимо израсходовать $0{,}001 \cdot 0{,}029 \cdot 58 \cdot 10^6 = 1680$ т чистой извести. Допуская в технической извести (U) 70% CaO, количество ее должно составлять $U = 1680 : 0{,}70 = 2400$ т. Эта масса извести осаждается в специальном бассейне, располагаемом на пути от водоумягчительной установки до водохранилища.

Доумягчение не следует растягивать на всю межень. Оно выполняется в течение 5—10 дней осенью или в начале зимы, когда карбонатная жесткость будет приближаться к $g_{пр}$. Можно это сделать и сразу после половодья для создания благоприятного режима работы установки в течение всей межени.

В примере расход воды на испарение (естественное и от подогрева) составляет в среднем за 11 месяцев межени 0,77 м³/с, а $Q_с = Q_ф + Q_з = 0{,}14$ м³/с. Начальная жесткость воды после половодья $g_1' = 3{,}5$ мг-экв/л. Продолжительность снижения жесткости забираемой из водохранилища воды до $g_1 = 3{,}0$ мг-экв/л при $k = = 0{,}2$ равна

$$T = \frac{58 \cdot 10^6}{0{,}77 + 0{,}14}\left[1 - \left(\frac{3{,}0}{3{,}5}\right)^{\frac{0{,}77+0{,}14}{0{,}2 \cdot 80 - 0{,}77}}\right] = 0{,}64 \cdot 10^6 \text{ с} = 7{,}4 \text{ сут.}$$

Осредненный расход технической извести на умягчительной установке за это время составит $2400 \cdot 10^3 : 640 \cdot 10^3 = 3{,}75$ кг/с.

При этом в водохранилище устанавливается заданная для начала межени жесткость воды и дальнейшее ее умягчение прекращается. К концу межени жесткость повысится до $g_{пр} = 3{,}0 + 2{,}0 = = 5$ мг-экв/л.

Если такое быстрое умягчение не приемлемо (судя по производительности умягчительной установки, требованиям рыбоводства и т. п.), то этот процесс следует в желаемой мере отрегулировать, изменив коэффициент умягчения воды k.

В заключение сравним эксплуатационные затраты для снижения жесткости (на 1,5 мг-экв/л) за счет допустимого предполоводного сброса и за счет умягчения воды.

При напоре (вместе с потерями напора) $H = 10$ м восполнение сброшенного объема требует из сети затраты электроэнергии

$$Э = \frac{9{,}81}{\eta_м \eta_н} QHT' = 12{,}2QHT' = 12{,}2 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 233 = 284 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где $Q = 10$ м³/с — производительность насосной станции подпитки; $T' = \dfrac{8{,}4 \cdot 10^6}{10 \cdot 3600} = 233$ ч — время восполнения сброшенного объема; $\eta_м = 0{,}95$ — к. п. д. мотора; $\eta_н = 0{,}84$ — к. п. д. насоса.

Для умягчения объема воды $58 \cdot 10^6$ м³ на 1,5 мг-экв/л по формуле (123) потребуется 3300 т чистой или 4700 т технической извести. Сравнивая, для упрощения, затраты только по стоимости извести и электроэнергии, найдем, что умягчение может оказаться выгоднее сброса воды и последующего его восполнения, если $US_и < ЭS_э$, где $S_э$, $S_и$ — стоимость 1 кВт · ч электроэнергии и 1 т технической извести.

В данном случае умягчение, вместо сброса, дающего снижение жесткости на 1,5 мг-экв/л, будет выгодно, если $4700S_и < 284 \times \times 10^3 S_э$.

Более глубокое снижение жесткости за счет сброса, как показано выше, невозможно. Необходимое дополнительное снижение ее (с 3,5 до 3,0 мг-экв/л) достигается только доумягчением.

Итак, для установленной производительности (мощности) предприятия с указанными отъемами воды на безвозвратное потребление и фильтрацию водохранилище будет иметь следующий режим.

От полного объема в конце весны 58 млн. м³ при карбонатной жесткости воды 3,0 мг-экв/л оно к концу зимы срабатывается на 26,5 млн. м³ с повышением жесткости до 5 мг-экв/л. Перед половодьем сбрасывается еще 8,4 млн. м³ воды с последующим заполнением водохранилища до НПГ в половодье. Подпитка составляет $\sim$35 млн. м³, причем жесткость снижается до 3,5 мг-экв/л, т. е. на 1,5 мг-экв/л. Кроме того, весь объем воды доумягчается еще на 0,5 мг-экв/л до исходной жесткости 3,0 мг-экв/л, так как без этого начнется нарастание жесткости из года в год. В общем такая же жесткость будет и в следующем году к концу заполнения водохранилища, и в дальнейшем наступит квазициклический для каждого года ход солевой концентрации от весны к межени со сбросом-подпиткой водоема весной и доумягчением воды в нем сразу же после подпитки или осенью.

Этот режим является обобщенным и представлен средними величинами объемов и концентраций. Понятно, что ежегодные циклы будут иметь некоторые различия. В отдельные годы режим будет корректироваться в зависимости от гидрометеорологических и водохозяйственных условий, т. е. от колебания величин $З + Ф$, $И_е + И_д$, $С$ и $g_п$.

Неустановившийся ход годовых гидрохимических режимов водоема будет наблюдаться в пусковой период (первые несколько лет его работы, зависящие от случайного качества воды при начальном заполнении, неустановившихся потерях на фильтрацию в этот период и т. п.). Такой же самостоятельный годовой режим солевых концентраций будет и в случаях значительного искусственного изменения величин, перечисленных выше (при расширении установки изменяются $И_д$, $З$, $С$ и т. п.). При этом половодное опреснение и последующее доумягчение будут планироваться для каждого года отдельно. Однако с течением времени, когда производительность установки из года в год будет поддерживаться на одном уровне и заданном внутригодовом режиме, а величины $З$, $Ф$, $И_д$ окажутся достаточно установившимися, солевой режим во-

доема в пределах каждого года будет также близким к циклическому.

Таким образом, воздействуя на водоем-охладитель, получающий подпитку из внешнего источника только в половодье, можно создать безнакипный режим работы теплообменников в течение всей межени. Для этого следует установить предельную для такого режима жесткость в конце межени (по эксплуатационным данным) и рассчитать повышение жесткости Δg за межень.

Это повышение может быть устранено полностью за счет необходимого сброса воды перед половодьем (с последующей подпиткой водохранилища пресным талым стоком) или частично на величину $\Delta g'$, соразмерно допустимому сбросу.

В последнем случае остаток, подлежащий устранению жесткости $\Delta g - \Delta g'$, может быть нейтрализован только химическим путем, в отличие от величины $\Delta g'$, устранение которой возможно за счет сброса или путем умягчения, причем окончательное решение выбирается на основании технико-экономического сравнения.

§ 42. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД И НАКОПИТЕЛИ КАК СРЕДСТВО САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Вопросы водного хозяйства в речных бассейнах с высокой минерализацией воды, в особенности при наличии промышленных и шахтных вод, требуют предварительного исследования «солевой нагрузки» (т. е. минерализации приточности) реки по ее длине.

Если известны приращения минерализации $\Delta\mu$ и расхода ΔQ на некотором участке реки, а также расход в начале участка Q_1 и общая минерализация в конце участка μ_2, то, очевидно, минерализация только той воды, которая поступает в реку на длине рассматриваемого участка (с частного водосбора), будет равна

$$\mu_{ч} = \frac{\Delta\mu Q_1 + \Delta Q \mu_2}{\Delta Q}. \qquad (124)$$

Если, например, на р. Северском Донце у пункта Маяки при расходе $Q = 7$ м³/с $\mu = 800$ мг/л, а у г. Лисичанска при $Q = 11{,}5$ м³/с $\mu = 1100$ мг/л, то минерализация приточности на участке Маяки—Лисичанск будет равна

$$\mu_{м-л} = \frac{300 \cdot 7 + 4{,}5 \cdot 1100}{4{,}5} = 1567 \text{ мг/л}.$$

Таким образом, пользуясь формулой (124), можно определить солевую нагрузку отдельных участков реки и их роль в минерализации стока. Это позволяет дополнить или проконтролировать гидрогеологические данные, а также выявить влияние промышленных сточных вод по отдельным участкам реки.

На основании исследования минерализации воды в реке по ее длине можно правильнее назначить створы плотин, места

водозабора и т. п. Кроме того, такое исследование должно содействовать правильной организации водного хозяйства в бассейне реки, выбору мест выпуска и степени необходимой локализации сточных вод [1] и т. п.

В промышленно развитых районах речной сток формируется как из природных вод (поверхностных и грунтовых), так и из сточных вод, которые поступают в реки с заводов, рудников, шахт, промыслов и т. п. Эти воды обычно сильно минерализованы и затрудняют использование речного стока в межень.

Большинство рек Украины, средней полосы ЕТС, Казахстана и других районов отличается весьма интенсивным стоком весной (в течение одного-двух месяцев) и очень малыми меженными расходами (в течение 10—11 месяцев). При этом поступающие в реку даже сравнительно небольшие объемы промышленных сточных вод, весьма насыщенных солями, вызывают повышение солевого состава меженных речных вод. Это относится к таким рекам Украины, как Северский Донец, и особенно к малым рекам Донбасса и Криворожья (Саксагань, Ингулец, Крынка, Миус, Кальмиус и т. д.). То же наблюдается на Оке, Каме, Белой и других реках нашей страны.

Правда, в некоторых технологических циклах сточные воды приобретают качества, благоприятные для водопотребителей. Например, вода из Оки, используемая Каширской ГРЭС для гидрозолоудаления, после смыва золы подмосковного угля и отстаивания имеет карбонатную жесткость 4,6° и pH = 7,5, тогда как карбонатная жесткость речной воды в естественном состоянии 16,8° и pH = = 8,1.

По данным Зуевской ГРЭС, карбонатная жесткость отстоенной воды равна приблизительно 8°, тогда как природная карбонатная жесткость воды, забираемой из р. Крынки, составляет около 15°. При этом в отстоенной воде этой ГРЭС появляется фосфат — ион P_2O_5 — в количестве 2 мг/л. Известно, что такие изменения в воде благоприятны против накипеобразования при использовании воды для охлаждения конденсаторов ГРЭС. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований и самостоятельных решений в каждом частном случае составления водного баланса.

Изложенные обстоятельства требуют выполнения некоторых мероприятий для устранения причин, приводящих реки в негодное для водопользования состояние. К таким мероприятиям относятся очистка сточных вод, переброска их в соседние, неиспользуемые речные системы, отвод этих вод на испарительные площадки, тушение кокса, грануляцию шлака и на другие заводские процессы, поглощающие или испаряющие воду.

Вместе с тем следует постоянно соблюдать экономию в расходовании воды на технологические нужды и не допускать ее потерь.

---

[1] Этим термином обозначается временное удержание промышленных сточных вод в месте их сбора (в частности, с применением регулирования их в накопителях, о чем изложено ниже). О локализации промышленных сточных вод упоминается в книге С. Н. Черкинского [134].

Борьба с потерями воды в промышленности ведется путем внедрения рационального, экономного потребления воды и возможно более полного возврата ее в водоемы после использования и соответствующей очистки. При этом из баланса исключаются только требующие дорогой очистки сточные воды, концентрированные рассолы, токсичные стоки и т. п.

Одним из наиболее радикальных приемов сохранения рек в пригодном для водопользования состоянии является локализация сточных вод в накопителях.

Накопители-регуляторы

Действие накопителей-регуляторов основано на использовании упомянутой выше неравномерности речного стока и его химического состава и состоит в следующем.

В течение всего периода низкого речного стока (межень) сточные воды путем организованного их отвода с предприятий собираются в пруды-накопители, а при наступлении весеннего половодья сбрасываются из накопителей в реку целиком или в соответствующем количестве в зависимости от нарастания или спада расходов воды в реке. Конструкция выпуска (например дырчатая труба) должна обеспечивать в месте сброса полное смешение стоков со всем расходом речной воды. Процесс сброса должен происходить с таким расчетом, чтобы не превышать при сбросе допустимых норм соленасыщения воды в реке [92]. Такие накопители применяются в практике. В частности, известны «белые моря» Славянского содового комбината и завода Доносды вдоль р. Северского Донца. Однако накопители по своему объему большей частью не соответствуют необходимым требованиям, а эксплуатация их бывает неудовлетворительной. Неудовлетворительность работы накопителей объясняется не только несоблюдением правил эксплуатации, но также и тем, что их объемы определяются часто лишь в зависимости от количества сточных вод за некоторый интервал времени (например, за межень). Между тем, будучи приуроченным к какой-нибудь реке для сбрасывания сточных вод во время половодья, накопитель должен составлять с рекой взаимодействующую систему. Поэтому в проектировании накопителя должны учитываться гидрологические особенности реки, состояние которой предполагается улучшить путем устройства накопителя.

Объем накопителя зависит не только от объема сточных вод, но также и от параметров речного стока: его внутригодовой неравномерности, изменчивости по годам и химического состава.

Расчет прудов-накопителей можно производить в следующем порядке.

1. Определяются вероятные по допустимой обеспеченности ($P\%$) ежегодные объемы половодий за n лет, т. е. за один, два, три года подряд и т. д., по статистическим характеристикам объемов половодий (средний объем половодья, коэффициенты вариации

$C_{vв}^{(n)} = C_{vв} : \sqrt{n}$ и асимметрии $C_{sв}^{(n)} = 2C_{vв}^{(n)}$) для рассматриваемых n-летий (см. § 11).

2. Для каждого n-летия определяется объем сбрасываемых в одно половодье сточных вод из расчета

$$C' = \frac{(J - J_e)\Pi_P^{(n)}}{J' - J}, \qquad (125)$$

где C' — объем сточных вод в м³, сбрасываемых в реку за одну весну, равный или меньше годового объема C этих вод, поступающих в накопитель; J' — концентрация рассматриваемого ингредиента (соли) в сточных водах в кг/м³; J — допустимая концентрация того же ингредиента в реке с учетом сброса сточных вод (заданный норматив) в кг/м³; J_e — естественная концентрация ингредиента в кг/м³ (определяется по данным наблюдений осредненно для всего половодья) [1]; $\Pi_P^{(n)}$ — объем половодья за одну весну для различных n-летий заданной обеспеченности P в м³.

3. Находится остаток сточных вод в накопителе за ряд n-летий (для $n = 1, 2, 3, \ldots$)

$$V = (C - C')\, n. \qquad (126)$$

Поскольку значения C' увеличиваются с увеличением n, то емкость V накопителя будет неодинакова для различных n-летий; она сначала возрастает, а потом убывает. Наибольшая из этих емкостей принимается за многолетнюю составляющую емкости накопителя $V_м$.

4. Весь регулирующий объем накопителя $V_р$ с учетом сезонной емкости (при равномерном в течение года поступлении сточных вод в накопитель) будет равен

$$V_р = V_м + \frac{t}{12} C. \qquad (127)$$

Здесь t — число месяцев низкого стока в году (от окончания одного до начала следующего половодья). Обычно $t = 10 \div 11$ месяцам, а при раннем окончании предыдущего и позднем следующем половодье интервал t может достигать 12 месяцев.

Следует отметить, что в некоторых случаях предпочтительнее повышенная концентрация солей в реке, но в течение более короткого времени. При этом учитывается не весь ежегодный, обеспеченный за n-летие объем весеннего стока $\Pi_P^{(n)}$, а только часть его на подъеме волны половодья (например, 40—60%). Такие случаи

[1] При незначительной естественной концентрации ингредиента в реке весной J_e по сравнению с допускаемой концентрацией J во время сброса сточных вод ошибка при назначении J_e в 50% и даже более во многих случаях оказывает небольшое влияние на объем накопителя, решающими для которого являются расчетные объемы стока ежегодных половодий за n-летия. Учет концентрации соленасыщения речного стока и анализ данных гидрохимических наблюдений более подробно излагаются в работах [85, 92, 134 и др.].

имеют место, когда желательно выпустить сточные воды, например, до начала нереста рыбы или когда необходимо остатком половодья промыть реку от сброшенных стоков, сократив одновременно продолжительность впитывания их в пойму реки и в подземные горизонты.

Многолетняя составляющая емкости накопителя может быть определена также по графикам $\beta_м$ (см. § 11). При этом графики применяются к средневесеннему стоку или к той его части, к которой приурочен сброс сточных вод.

Пусть, например, объем (норма) весеннего стока равен 1370 млн. м³. Предполагается сбрасывать сточные воды только в первую фазу половодья, используя лишь 40% всего объема половодья. Значит располагаемый объем среднего половодья равен $0{,}40 \cdot 1370 = 548$ млн. м³. Водопотребление (отдача) заменяется потребностью в воде для заданной кратности (m) разбавления сточных вод C речной водой. Пусть $C = 6{,}73$ млн. м³, $m = 50$, тогда водопотребление равно $6{,}73 \cdot 50 = 336$ млн. м³, причем требуемый коэффициент регулирования весеннего стока (заменяющий степень регулирования сточных вод в накопителях) будет равен $\alpha = 336 : 548 = 0{,}614$.

Если, например, коэффициент вариации весеннего стока $C_{vв} = 0{,}78$ и обеспеченность соблюдения заданного разбавления располагаемым весенним стоком $P = 97\%$, то при $\alpha = 0{,}614$ коэффициент многолетней составляющей емкости для весеннего стока равен $\beta_м = 1{,}16$ (по графикам Плешкова), а объем регулятора весеннего стока достигает $V'_м = 1{,}16 \cdot 548 = 635$ млн. м³. Переходя к многолетней составляющей емкости накопителя, находим, что она должна быть равна $V_м = V'_м : m = 635 : 50 = 12{,}7$ млн. м³.

В случае, если сброс из накопителя в реку производится в течение всего года с соблюдением заданного предельного насыщения для весны и межени (например, для весны концентрация хлоридов в реке по условиям нереста задана равной $J = 300$ мг/л, а в межень $J = 500$ мг/л), то расчет выполняется в следующем порядке.

По данным о естественной концентрации хлоридов $J_е$ в речном стоке в виде зависимости $Cl = \varphi(Q)$ или в виде осредненных значений Cl по сезонам (весна, лето, осень, зима или для весны и межени) по формуле (125) подсчитывается объем сточных вод $C'_м$, который можно сбросить в реку, по месяцам каждого наблюденного по стоку года.

Суммируя помесячные сбросы $C'_м$ за каждый год (или за характерные по водности годы), получаем годовые величины сбросов $C'_г$, относящиеся к соответствующим объемам наблюденного годового стока $Г$, и, проводя осредняющую кривую, строим график зависимости $C'_г = \varphi(Г)$. Пользуясь этим графиком, можно найти объем сбрасываемых в реку сточных вод $C'_г$ за год в целом для расчетных величин годового стока по n-летиям, определяемых по статистическим параметрам ($Г_0$, C_v, C_s, $P\%$). При этом объем

сточных вод в накопителе за n-летие определится по соотношению, аналогичному (126),

$$V=(C-C_г')n. \qquad (126')$$

За окончательную принимается та величина V (из всех емкостей для ряда n-летий), которая будет наибольшей и рассматривается как многолетняя составляющая $V_м$.

Весь регулирующий объем накопителя $V_р$ с учетом сезонной составляющей емкости $V_с$ будет равен

$$V_р=V_м+V_с. \qquad (128)$$

Здесь $V_с$ — объем, который остается в накопителе за весь меженный период (10—11 месяцев) и устанавливается на основе совместного рассмотрения двух годовых интегральных кривых: поступления сточных вод в накопитель и сброса их из накопителя в реку. Наибольшая разность между этими кривыми дает внутригодовую, или сезонную, емкость накопителя.

Поскольку сброс сточных вод в реку по годам неодинаков, то при выборе величины $V_с$ интегральные кривые их поступления в накопитель и сброса из него в реку (с соблюдением в ней заданной результирующей концентрации Cl) строятся по месячным данным для нескольких отдельных лет из фактического ряда стока. При этом отбираются такие годы, которые по графику $C_г'=\varphi(Г)$ обеспечивают сброс в реку сточных вод в объеме, равном или более годового их поступления C.

Таким же образом производится определение емкости накопителя (с весенним или непрерывным сбросом сточных вод), если расчет ведется не по хлоридам, а по иному ингредиенту или по общей минерализации.

Наименьшая гарантируемая концентрация ионов в реке при регулировании выпуска сточных вод не может быть ниже концентрации, получающейся при сбросе их годового объема в среднее половодье (весенний выпуск) или в средний по водности год [1] (при круглогодовом сбросе).

Так, если за год поступает сточных вод $C=6{,}90$ млн. м³ с концентрацией хлоридов $J'=155$ кг/м³, а параметры весеннего стока $П_{ср}=1600$ млн. м³, $C_{св}=0{,}71$, $C_{зв}=1{,}42$ и естественная концентрация хлоридов $J_е=0{,}065$ кг/м³, то при сбросе сточных вод весной в среднее половодье (с предельно высоким регулированием их) концентрация хлоридов в реке будет равна

$$J_{мин}=\frac{155\cdot 6{,}90+0{,}065\cdot 1600}{6{,}90+1600}=0{,}730 \text{ кг/м}^3.$$

При ежегодном полном сбросе весной годового объема сточных вод (без их многолетнего регулирования) емкость накопителя ос-

[1] Указанный лимит аналогичен лимиту отдачи водоема при регулировании речного стока. Отдача практически не может быть выше объема стока в средний год, а коэффициент регулирования более единицы (см. § 9).

ветленной жидкости будет, очевидно, составлять приблизительно 7 млн. м³. Но в случае наступления маловодной весны ($P=97\%$, $П_P=214{,}5$ млн. м³, $J_e=0{,}065$ кг/м³) концентрация хлоридов в реке при сбросе сточных вод будет достигать

$$J_{макс}=\frac{155\cdot 6{,}90+0{,}065\cdot 214{,}5}{6{,}90+214{,}5}=4{,}890 \text{ кг/м}^3.$$

Очевидно, для уменьшения этой концентрации хлоридов в реке при сбросе сточных вод требуется их многолетнее регулирование с увеличением емкости накопителя. Величина его изменяется от $V_р=C$ до $V_р=(2\div 3)C$ и более в зависимости от концентрации, назначаемой в интервале от $J=J_{макс}=4890$ мг/л до величины J, близкой к $J_{мин}$. При указанном режиме сбросов такой предельной минимальной величиной концентрации хлоридов является 730 мг/л, но достичь ее практически невозможно из-за резкого нарастания емкости накопителя при приближении к $J_{мин}$. В частности, для приведенного примера получены следующие данные для $P=97\%$.

Концентрация при сбросе, мг/л	1100	1000	900	800	750
Объем накопителя, млн. м³ . .	15,5	18,0	22,0	28,5	33,5

Данная схема расчетов не учитывает потерь воды из накопителя на испарение E и фильтрацию $Ф$.

Следует иметь в виду, что потери E (равные годовому испарению с водной поверхности $E_в$ минус годовые осадки X) меньше потерь с пресноводных водоемов, так как величина $E_в$ для накопителей меньше соответствующей величины для пресных вод, зависит от характера собираемой жидкости и в ряде случаев бывает незначительной.

Расчет с исключением потерь выполняется в следующем порядке.

Если фильтрацию из накопителя учитывать также высотой слоя в мм/год, то уменьшение емкости составит

$$\Delta V=1000\,(E+Ф)\,(n+1)\,F \text{ м}^3, \qquad (129)$$

где n — длительность накопления сточных вод в годах [единица в формуле (129) соответствует дополнительному году для учета сезонной емкости]; F — площадь накопителя в км². Эта площадь определяется по наиболее выгодной глубине h, соответствующей минимуму затрат на ограждающие дамбы и другие устройства ($F=V_р:h$). Этот вопрос изложен в работе [86].

Определив экономически выгодную глубину h, находим остаточный объем накопителя с исключением потерь [1].

Точнее учет потерь из накопителя при определении его емкости может быть выполнен табличным способом (подобно обычному

[1] Перед накопителем или в одной из его секций должен быть предусмотрен резервуар для осаждения шлама, приносимого суточными водами. Например, дистиллерные воды приносят шлам в количестве 15—20% объема.

водохозяйственному расчету) с разделением каждого года $(n+1)$-летия на два или три сезона [весна и межень или лето—осень, зима и весна]. Сброс сточных вод из накопителя в реку в эти сезоны определяется по формуле (125) с учетом изменяющейся за счет испарения концентрации J'. Конечные концентрация, объем сброса в реку и объем накопителя одного сезона становятся начальными для следующего сезона. При этом имеется в виду, что накопитель огражден от попадания в него природного стока с тяготеющего к нему водосбора. В противном случае необходимо учитывать поступление в накопитель природных вод, разбавление ими сточных вод и изменение режима взаимодействия накопителя и реки.

Накопители-испарители

В зонах с жарким климатом не подлежащие возврату сточные воды локализуются в накопителях-испарителях. При этом «потеря» на испарение является спасительным, иногда единственным средством избавления от «отходов» воды и средством охраны водных ресурсов.

Поступающие в накопитель-испаритель сточные воды, имеющие весьма растворимые соли (ряд хлористых, сернокислых и других соединений), хотя бы и в небольших концентрациях, будут в течение нескольких лет испаряться. От года к году будет повышаться концентрация накопленных стоков. Поскольку упругость паров над осолоненным водоемом понижается по сравнению с упругостью их у поверхности пресной воды, то испарение из накопителя с течением времени будет уменьшаться, начнут появляться и накапливаться неиспарившиеся за год остатки соленых стоков.

А. Б. Здановским (см. книгу «Физико-химические исследования солевых систем») установлено, что коэффициент a упомянутого понижения упругости водяных паров над осолоняющимся водоемом колеблется в широких пределах и зависит не только от концентрации раствора, но и от состава солей в нем.

Так, для трехкомпонентной системы $NaCl—CaCl_2—H_2O$ коэффициент a при $t=25°$ С колеблется от 0,29 до 1,0; для системы $NaCl—Na_2SO_4—H_2O$ $a=0{,}75 \div 1{,}0$.

Состав сточных вод должен быть задан с выделением всех веществ (чистой воды и всех солей) в весовых процентах $K\%$, т. е. числом граммов вещества в 100 г раствора.

По преобладающим солям в растворе (например, NaCl и $CaCl_2$) устанавливается трехкомпонентная система, причем остальные имеющиеся в растворе соли суммируются с преобладающими по близким физико-химическим свойствам. Затем для этой системы строится номограмма, причем по оси ординат в масштабе откладываются концентрации $K\%$ всех солей, отнесенных к одной преобладающей соли (NaCl), а на оси абсцисс — концентрации $K\%$ всех солей, отнесенных ко второй преобладающей соли ($CaCl_2$).

Точки концентраций на осях координат, соответствующие одинаковым коэффициентам a, установленным опытным путем [124]

для упомянутой трехкомпонентной системы раствора, соединяются прямыми линиями.

При этом на пересечении координат, соответствующих известным концентрациям солей NaCl и $CaCl_2$, определяется искомый коэффициент a.

М. М. Викторов (см. «Графические расчеты в технологии минеральных веществ». М., Госхимиздат, 1954) для объяснения хода испарения воды из тройных систем использует изотермическую диаграмму растворимости. Такая диаграмма показывает возможное изменение концентраций двух солей в насыщенном растворе при t=const. Добавление одной из них снижает растворимость второй соли и некоторая ее часть переходит при этом в твердую фазу.

Совмещение номограммы А. Б. Здановского и кривой растворимости М. М. Викторова (рис. 112) позволяет при расчете испарения вести для каждой из солей баланс ее в растворе и в твердой фазе. А это и необходимо при определении коэффициента a и расчете испарения для любого года эксплуатации накопителя.

Начало координат на рис. 112 соответствует чистой воде. Точки в различных зонах квадранта соответствуют:

в зоне $ACB0$ — ненасыщенным растворам, вне этой зоны — смесям насыщенного раствора с одной или двумя твердыми фазами;

в зоне *I* — смесям твердой соли NaCl (в осадке) и насыщенных растворов, представленных точками на кривой AC;

в зоне *II* — смесям твердой соли $CaCl_2$ и насыщенных растворов, представленных точками на кривой BC;

в зоне *III* — смесям твердых солей NaCl и $CaCl_2$ с эвтоническим раствором (насыщенным обеими солями).

Прямая $0P_n$ соответствует постоянному соотношению количеств обеих солей, но разной концентрации раствора (в зоне $ACB0$).

Состав трехкомпонентной системы, содержащий одну из солей (например, NaCl) в твердой и ионной фазах, изображается точкой P_2. Для определения состава системы следует из этой точки провести прямую, параллельную оси с масштабом соли, находящейся в осадке, до пересечения с кривой растворимости в точке m_2.

Величина P_2m_2 есть количество соли (в весовых процентах), выпавшей из раствора, а остальные соли, находящиеся в растворе, определяются непосредственно по координатам точки m_2.

Пусть поступающие в накопитель стоки ненасыщены; составу их соответствует точка P внутри контура $ACB0$. По мере испарения воды из раствора, концентрация солей увеличивается, но весовое соотношение их остается постоянным, в связи с чем точка, характеризующая состав раствора, перемещается вдоль

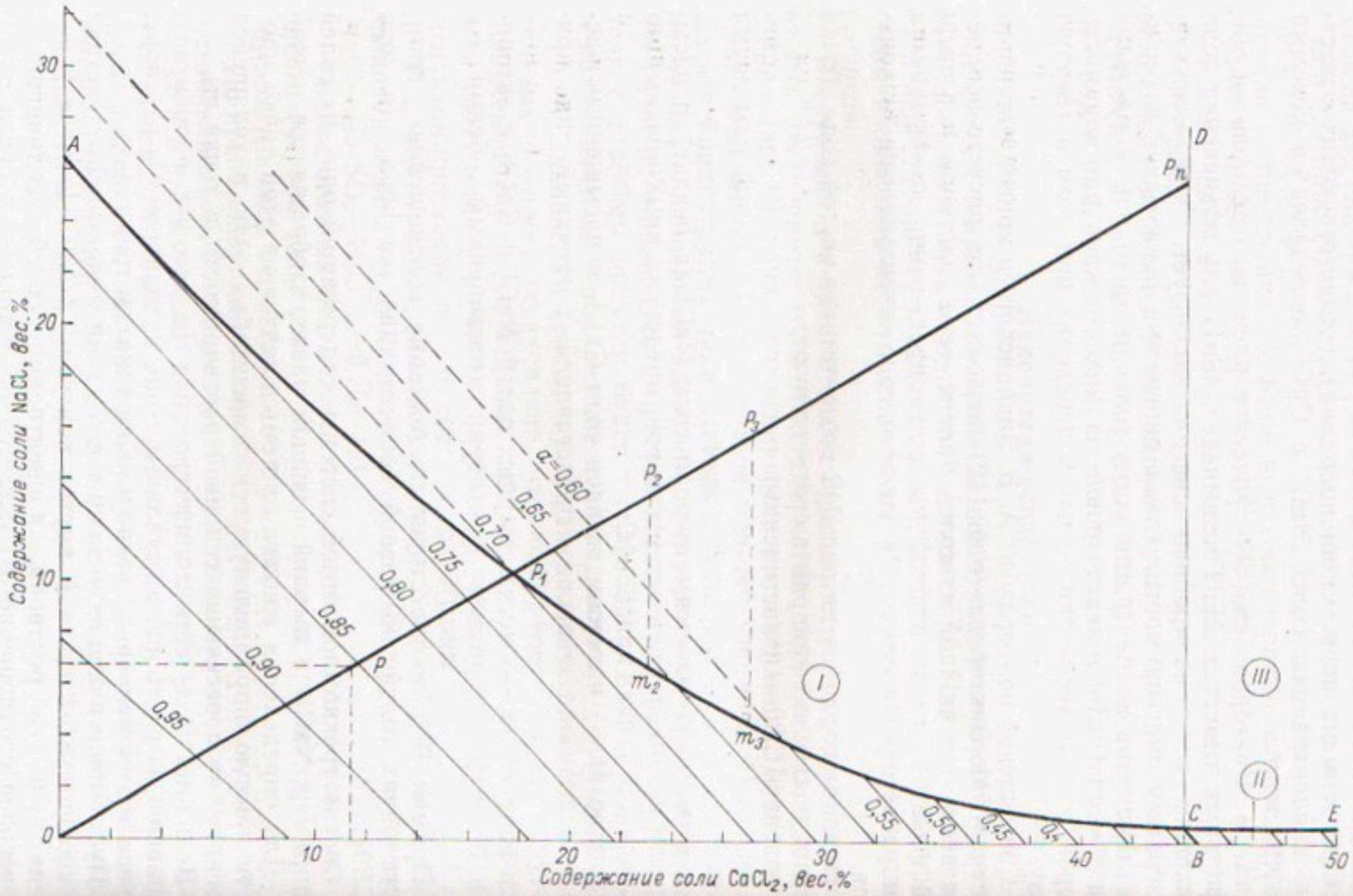


Рис. 112. Изотермическая диаграмма растворимости в трехкомпонентной системе

прямой $0P$, исходящей из начала координат по направлению возрастающих концентраций (до точки P_1 на кривой насыщения).

Когда точка достигнет ветви кривой растворимости в точке P_1, раствор считается насыщенным по соли NaCl. При дальнейшем испарении воды из системы будет выделяться в осадок соль NaCl. Так как испарение вызывает и повышение концентрации соли $CaCl_2$, то точка, характеризующая состав раствора, движется по кривой растворимости, удаляясь от точки A по направлению к эвтонической точке C, причем состав раствора изменяется.

Поскольку испаряется только вода, а соотношение солей в общем составе солей всей системы (раствор+осадок) остается постоянным, то точка, показывающая состояние системы, движется по прямой $0PP_1 \ldots P_n$, занимая ряд промежуточных положений.

Когда эта точка передвинется в положение P_n, раствор, насыщенный NaCl, через точки m_2, m_3 ... переходит в эвтоническое состояние (точка C), т. е. становится насыщенным обеими солями и в дальнейшем опять не меняет своего состава. При испарении из воды в осадок выделяются соли NaCl и $CaCl_2$ в том же соотношении, в каком они находятся в растворе, соответствующем точке C.

После многолетнего поступления стоков в накопитель-испаритель он обычно превращается в накопитель-аккумулятор слабо испаряющейся, насыщенной обеими солями жидкости. Только через несколько лет после прекращения притока сточных вод жидкость может полностью испариться.

Такова общая полная схема процесса. Однако в случаях притока не очень концентрированных растворов (10—20 г/л) при весьма большой площади накопителя раствор может не дойти до полного насыщения. На каком-то году эксплуатации рост концентрации прекратится: на сколько она повысится из-за испарения, настолько же разбавится остающейся из годового притока жидкостью. Годовой объем остаточной (после испарения) жидкости будет в таком случае иметь собственную концентрацию соли, поступившей за год, ту же, что и в накопителе до этого года. В дальнейшем объем жидкости в накопителе будет увеличиваться за счет ежегодных неиспарившихся остатков при постоянной концентрации раствора (см. пример).

Расчет накопителя-испарителя производится для заданного периода его эксплуатации и сводится к определению глубины накопителя или высоты дамб, ограждающих выделенную для него площадь $\omega_н$.

При длительном расчетном периоде эксплуатации расчеты испарения приходится выполнять не по месяцам, а по сезонам или по полугодиям — холодному и теплому — для каждого года. Расчеты по полугодиям сводятся к следующему.

Наряду с непрерывным подсчетом нарастающего веса каждой соли в накопителе, необходимо вести подсчет нарастающей высоты слоя химически чистой воды (H_2O).

Баланс чистой воды в накопителе к концу i-того полугодия будет (в мм слоя на площади $\omega_н$):

приходная часть — осадки $h_о$, основная часть (H_2O) сточных вод $h_с$ и вод суши $h_в$ с прилегающего водосбора за полугодие, а также количество чистой воды в накопителе к началу полугодия $h_н$;

расходная часть — испарение воды за полугодие $E_i = r_i E_в$, фильтрация $h_ф$.

Слой чистой воды к концу полугодия будет равен

$$H_i = h_с + h_в + h_о + h_н - r_i E_в - h_ф. \qquad (130)$$

Исходное испарение с поверхности пресного водоема ($E_в$), осадки и поверхностный сток принимаются по годам постоянными, равными норме, в связи с многолетним ходом процесса испарения и аккумуляции. Значение коэффициента r_i, который менее единицы и может быть отрицательным (при конденсации паров из воздуха на поверхности накопителя в холодное полугодие), определяется в зависимости от концентрации раствора, как показано ниже.

Концентрация $K\%$ раствора в накопителе в конце любого полугодия рассчитывается для каждой соли по формуле

$$K\% = \frac{100\,(G + g)}{V_н + V_п + G' + g' - V_н - V_ф}, \qquad (131)$$

где G, g — вес данной соли в накопителе (в растворе и кристаллах): G — к началу полугодия, g — пополнившей накопитель за этот интервал ($g = g_с - g_ф$, причем $g_с$ — вес данной соли, поступившей за интервал, $g_ф$ — вес той же соли, ушедшей при фильтрации жидкости с концентрацией, полученной для наличной емкости накопителя в середине полугодия), т; G', g' — то же вместе со второй солью, т; $V_н$, $V_п$ — объем (вес) чистой воды, имеющейся в накопителе к началу полугодия $V_н$ и поступившей за этот интервал $V_п$ (за счет осадков, поверхностного стока, сточных вод), т; $V_н$, $V_ф$ — объем (вес) воды, испарившейся из накопителя и ушедшей на фильтрацию за полугодие, т.

При отсутствии фильтрации $g_ф$ и $V_ф$ равны нулю, $g = g_с$ и расчет упрощается.

Значение $K\%$ обобщает обе фазы соли, твердую и ионную, но принимается равной величине для ионной фазы, т. е. концентрация, полученная по формуле (131), должна быть ограничена пределами по линии насыщения на диаграмме (в точках m_2, m_3, . . .; соответствующих концентрации второй соли). Поскольку для каждой соли принятая величина $K\%$ относится к концу полугодия, ее следует осреднить с предыдущей величиной, относящейся к началу полугодия, и уточнить расчет испарения за этот интервал.

Таким образом, расчет испарения и концентраций для каждого интервала производится подбором, так как средняя за интервал величина $K\%$ каждой соли наперед не известна.

Имея средние за полугодие концентрации $K\%$ для каждой соли, по диаграмме определяем коэффициент a_i и затем находим расчетную величину испарения по формуле

$$E_i = \frac{a_i e_м - e_{200}}{e_м - e_{200}} E_в, \tag{132}$$

где a_i — коэффициент приводки максимальной упругости паров у поверхности пресного водоема $e_м$ (мб при температуре раствора) к максимальной упругости паров у поверхности накопителя для i-того интервала; e_{200} — упругость паров воздуха (мб) в том же интервале на высоте 200 см от поверхности раствора в накопителе; r_i — коэффициент приводки испарения с поверхности пресного водоема $E_в$ (при температуре раствора) к испарению из накопителя E_i, причем

$$r_i = \frac{a_i e_м - e_{200}}{e_м - e_{200}}. \tag{133}$$

Среднее испарение с поверхности пресного водоема [124] до суммирования его по полугодиям определяется по месяцам. Для этого температура поверхностного слоя водоема $t_в$ также учитывается по месяцам из наблюдений на каком-нибудь мелководном, желательно соленом, водоеме в этом районе.

При определении же коэффициентов r_i ежемесячные значения $e_м$ и e_{200} осредняются по полугодиям.

К концу периода эксплуатации в накопителе окажется:

солей NaCl в растворе и осадке — X т,
» $CaCl_2$ » » — Y т,
чистой воды (H_2O) » — Z т.

При этом для NaCl

$$K_1{}^0/_0 = \frac{100X}{X+Y+Z},$$

чему соответствует плотность ρ; для $CaCl_2$

$$K_2{}^0/_0 = \frac{100Y}{X+Y+Z},$$

чему соответствует плотность φ.

Общая плотность для всей жидкости с обеими солями в накопителе (см. «Справочник химика», т. 3. Л., «Химия», 1964)

$$d = \frac{K_1 + K_2}{\frac{K_1}{\rho_{K_1+K_2}} + \frac{K_2}{\varphi_{K_1+K_2}}}, \tag{134}$$

где $\rho_{K_1+K_2}$ и φ_{K+K_2} — плотность растворов NaCl и $CaCl_2$ при концентрации (в весовых процентах), равной K_1+K_2. Общий вес воды и солей равен $G_0 = X+Y+Z$; общий объем воды и солей $V_0 = G_0 : d$, в том числе объем соли (в растворе и осадке) $S_0 = V_0 - Z$.

Если часть солей, судя по диаграмме растворимости (рис. 112), отложилась в кристаллах, то их объем определяется по соответствующему удельному весу этих солей, а остаток веса раствора переводится в объем, учитывая по диаграмме предельные значения K_1 и K_2 по вышеизложенному. Общий объем накопителя будет равен сумме объемов раствора и кристаллов.

Общая высота слоя воды и соли к концу заданного периода эксплуатации накопителя

$$H_0 = V_0 : \omega_н.$$

Если высота H_0 оказалась слишком велика, или наоборот, следует изменить площадь накопителя $\omega_н$ и проделать расчет снова.

Таблица 89

Количество и состав сточных вод

Годы	Объем сточных вод, млн. м³/год	Концентрация, г/л	
		NaCl	$CaCl_2$
1	3,26	8,3	—
2	6,05	6,4	6,8
3	8,84	6,4	6,8
4	11,9	6,4	6,8
5—25	14,7	6,4	6,8

Изложенный метод расчета испарения солевых растворов не применим к растворам органических веществ и жидкостям, покрытым маслянистыми пленками. Испарение в таких случаях следует учитывать на основании натурных наблюдений.

Пример. В пункте Н накопитель-испаритель площадью 25 км² должен в течение 25 лет принимать сточные воды, количество и состав которых дается в табл. 89.

Анализ средних за многолетие гидрометеорологических данных по месяцам года позволяет выделить два основных полугодия — холодное и теплое (табл. 90), для которых и выполнены расчеты за все 25 лет.

Таблица 90

Средние многолетние гидрометеорологические показатели для района накопителя

Гидрометеорологический показатель	Полугодие	
	теплое (IV—IX)	холодное (X—III)
Температура воздуха t_{200} °С	21,7	4,4
Упругость паров воздуха e_{200} мб	6,8	6,2
Скорость ветра (приведенная к высоте 2 м над поверхностью воды) w_{200} м/с	1,23	1,44
Температура поверхности воды (по данным для ближайшего мелководного озера) $t_в$ °С	20,3	7,2
Максимальная упругость пара (по температуре воды) $e_м$ мб	23,8	10,2
Испарение с пресного водоема $E_в$ мм	820	323
Осадки, мм	75	207

Таблица 91

Расчет количества воды и солей в накопителе за период его эксплуатации

Год	Сезон	Средняя за сезон концентрация солей в накопителе, весовые проценты		Коэффициент r_l	Испарение из накопителя за сезон		Объем чистой воды в накопителе к концу сезона (без учета испарения), млн. м³	Остаток чистой воды в накопителе к концу сезона (с учетом испарения), млн. м³	Нарастающее количество солей в накопителе (в ионах и кристаллах), млн. т		
		NaCl	$CaCl_2$		E_l мм	U_l млн. м³			NaCl	$CaCl_2$	сумма солей
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1972	Теплый	—	—	—	—	—	3,50	0	0,014	—	0,014
	Холодный	—	—	—	—	—	6,79	0	0,028	—	0,028
1973	Теплый	8,45	3,51	0,880	724	4,89	4,89	0	0,048	0,020	0,068
	Холодный	7,38	4,33	0,811	262	6,55	8,18	1,63	0,068	0,040	0,108
1974	Теплый	9,80	7,15	0,810	665	7,92	7,92	0	0,096	0,070	0,166
	Холодный	6,73	5,43	0,785	254	6,35	9,58	3,23	0,124	0,100	0,224
1975	Теплый	8,46	7,31	0,830	680	11,05	11,05	0	0,162	0,140	0,302
	Холодный	7,02	6,32	0,762	246	6,15	11,10	4,95	0,200	0,180	0,380
1976	Теплый	8,37	7,80	0,830	680	14,17	14,17	0	0,247	0,230	0,477
	Холодный	7,54	7,18	0,725	234	5,85	12,51	6,66	0,294	0,280	0,574
	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
1995	Теплый	9,20	9,64	0,782	641	16,04	30,54	14,50	2,033	2,130	4,163
	Холодный	9,20	9,65	0,600	194	4,85	27,01	22,16	2,080	2,180	4,260
1996	Теплый	9,20	9,65	0,782	641	16,04	31,38	15,34	2,127	2,230	4,357
	Холодный	9,20	9,65	0,600	194	4,85	27,85	23,00	2,174	2,280	4,454

Испарение из накопителя E_i определено по соотношениям для теплого полугодия

$$E_i = \frac{a_i e_м - e_{200}}{e_м - e_{200}} E_в = \frac{a_i \cdot 23{,}8 - 6{,}8}{23{,}8 - 6{,}8} \cdot 820 = 820 r_i \text{ мм},$$

для холодного полугодия

$$E_i = \frac{a_i \cdot 10{,}2 - 6{,}2}{10{,}2 - 6{,}2} \cdot 323 = 323 r_i \text{ мм}.$$

Расчет выполнен для того и другого полугодия каждого года путем подбора, без учета фильтрации (табл. 91).

Коэффициент r_i определялся по формуле (133), в которой коэффициент a_i снимался с графика (рис. 112) по средним за сезон концентрациям (весовых %) в накопителе отдельно каждой соли NaCl и $CaCl_2$. Эти среднесезонные концентрации определялись по соотношениям соответственно нумерации граф табл. 91, составленной инженером Т. А. Максимовой:

$$(3)_i = \frac{100\,(10)_i}{[(9)_{i-1} + (9)_i] : 2 + (12)_i} \quad \text{и} \quad (4)_i = \frac{100\,(11)_i}{[(9)_{i-1} + (9)_i] : 2 + (12)_i}.$$

При значительных приращениях количества солей от сезона к сезону средние концентрации их в накопителе следует определять более строго, а именно:

$$(3)_i = \frac{100\,[(10)_{i-1} + (10)_i]}{[(9)_{i-1} + (9)_i] + [(12)_{i-1} + (12)_i]}$$

$$\text{и} \quad (4)_i = \frac{100\,[(11)_{i-1} + (11)_i]}{[(9)_{i-1} + (9)_i] + [(12)_{i-1} + (12)_i]}.$$

Результаты расчетов:

$$K_1 = \frac{100X}{X + Y + Z} = \frac{100 \cdot 2{,}174}{2{,}174 + 2{,}28 + 23{,}0} = 7{,}93\%;$$

$$K_2 = \frac{100 \cdot 2{,}28}{2{,}174 + 2{,}28 + 23{,}0} = 8{,}32\%;$$

$$d = \frac{K_1 + K_2}{\frac{K_1}{\rho_{K_1+K_2}} + \frac{K_2}{\varphi_{K_1+K_2}}} = \frac{7{,}93 + 8{,}32}{\frac{7{,}93}{1{,}119} + \frac{8{,}32}{1{,}143}} = 1{,}13 \text{ т/м}^3,$$

$$V_о = G_о : d = (2{,}174 + 2{,}28 + 23{,}0) \cdot 10^6 : 1{,}13 = 24{,}3 \cdot 10^6 \text{ м}^3,$$

$$H_о = V_о : \omega_н = 24{,}3 \cdot 10^6 : 25{,}0 \cdot 10^6 = 0{,}97 \approx 1{,}0 \text{ м}.$$

В настоящее время расчеты накопителей-испарителей выполняются на ЭВМ по программе, разработанной В. И. Мухопадом во ВНИИ по охране вод (ВНИИВО).

Вопросы главы XII освещаются в работах [85, 86, 87, 92, 101, 124, 134, 140, 141] и др.

Глава XIII

РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА ПОЛОВОДИЙ И ПАВОДКОВ

§ 43. РАСЧЕТНЫЕ НОРМАТИВЫ И УЧЕТ РЕТРАНСФОРМАЦИИ ВЫСОКИХ ВОД. БЕРЕГОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Вопросы, относящиеся к этой главе, С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем [61] подразделяются на три группы: 1) гидрологическую, 2) гидравлическую (с выбором размеров водосбросных сооружений) и 3) водохозяйственную.

Нормативы первой группы (максимальные расходы $Q_м$, объемы притока $\sum Q$ и гидрографы высоких вод), относящиеся к области гидрологии, освещаются здесь лишь частично.[1]

Общепринятым принципом выбора максимальных расходов для сооружений является определение обеспеченных величин $Q_м$ согласно указаниям [93, 121]. При этом установлены следующие ежегодные вероятности превышения расходов $Q_м$.

Класс капитальности сооружений	I	II	III	IV
Ежегодная вероятность превышения $Q_м$, $P\%$	0,01	0,1	0,5	1

Для временных гидросооружений принимается $P=10\%$, а для временных сооружений, отнесенных к IV классу, $P=1\%$.

Гидротехнические сооружения (независимо от их класса), разрушение которых из-за недостаточности размеров водосброса угрожает катастрофическим наводнением, необходимо проверять на вероятность $Q_м$, уменьшенную до 0,01%, причем к величинам $Q_м$ добавляется гарантийная поправка [93].

Во всех случаях следует проверять соответствие кривой обеспеченности и принятых ее параметров (норма $\overline{Q}_м$, C_v, C_s) расположению точек фактических наблюдений, а также сопоставлять расчетные величины с историческими расходами на данной реке и соседних водотоках, находящихся в сходных физико-географических условиях[2]. Обеспеченность фактических расходов при нанесении их на график определяется по формуле (9) или (10).

---

[1] Отметим попутно, что выбор расчетных величин $Q_м$ по принципу экономического обоснования с допущением аварий в практике применения не нашел [83].

[2] Однако надо иметь в виду, что оценка вероятности ливневых расходов с использованием исторических максимумов по другим рекам должна учитывать несовпадение ливней с данным водосбором. Подробнее об этом изложено в работе [59] и в статье [84].

Максимальные расходы и гидрографы должны относиться к входному створу водохранилища, за который обычно принимается место выклинивания подпора при НПГ в межень.

Если на участке от входного створа до плотины имеются притоки, то при расчетах трансформации гидрографа высоких вод по методам гидравлики неустановившегося движения (см. § 33) следует установить распределение поступающей воды по гидрографам входного створа и главных притоков. Эти гидрографы должны быть увязаны по времени и очертанию таким образом, чтобы не нарушалась обеспеченность расхода в основном русле между притоками и соблюдался баланс воды между смежными створами основной реки. В случаях, когда расчетный гидрограф устанавливается по фактическим данным гидрометрического пункта в створе плотины, при наличии широкой поймы, которая будет затоплена водохранилищем, эти исходные данные содержат естественное регулирование высоких вод поймой.

Поскольку трансформация паводков водохранилищем также будет производиться, причем иначе, чем в естественных условиях, необходимо исключить возможность повторного учета срезки максимума. Для этого гидрограф во входном створе строится с исключением регулирующего влияния поймы на участке подпора. Это построение носит название *ретрансформации* гидрографа.

Ретрансформация производится путем решения уравнения неразрывности потока

$$Q' = Q'' + \frac{\Delta v}{\Delta t} - Q_{\text{пр}} + (Q_{\text{и}} - Q_{\text{о}}). \qquad (135)$$

Здесь Q' — расход воды на входном гидрографе, средний за расчетный промежуток времени Δt ($\Delta t = 1 \div 2$ суткам для половодий и $\Delta t = 1 \div 2$ часам для паводков); Q'' — то же в замыкающем гидрометрическом створе, к которому относится гидрограф, подлежащий ретрансформации; $Q_{\text{пр}}$ — средний за тот же промежуток времени расход воды из притоков между входным и замыкающим створами; Δv — приращение объема воды в русле между теми же створами (определяется по уровням воды на водомерных постах в пределах исследуемого участка); $Q_{\text{и}}$ — расход потерь воды из русла на испарение и фильтрацию; $Q_{\text{о}}$ — расход осадков на поверхность реки. Величина $Q_{\text{и}} - Q_{\text{о}}$ в связи с трудностями оценки ее обычно не учитывается, хотя в некоторых случаях она может быть значительной.

Полученный таким образом гидрограф во входном створе будет более высоким и несколько сжатым по сравнению с исходным гидрографом у замыкающего створа. Восстановленный гидрограф у входного створа фактически должен иметь еще более сжатую форму, так как при этом не учитывается объем воды, ушедшей на насыщение поймы; в новых условиях насыщение поймы при прохождении высоких вод не потребуется, так как она будет затоплена водохранилищем.

Расчет ретрансформации половодья показан в табл. 92 на примере восстановления входного гидрографа по наблюденному в замыкающем створе. Объемы русла от входного до замыкающего створа определены по кривой $v=\varphi(Q)$, которая строится суммированием емкостей по отдельным участкам между водпостами с использованием относящихся к ним связей $Q=\varphi(Z)$ и поперечных сечений.

Таблица 92

Расчет ретрансформации гидрографа весеннего половодья. $\Delta t=1$ суткам

№ интервала	Наблюденный расход воды в замыкающем створе Q'' м³/с	Объем русла к началу интервала v млн. м³	Приращение объема за интервал Δv млн. м³	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$ м³/с	Расход у входного створа $Q'=Q''+\frac{\Delta v}{\Delta t}$ м³/с	Объем стока за сутки, млн. м³	Суммарный сток, млн. м³
1	415	474	0	0	415	36	36
2	868	525	51	590	1458	126	162
3	1280	574	49	567	1847	160	322
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
8	2460	760	32	370	2830	244	1406
9	2580	790	30	347	2927	253	1659
10	2660	820	30	347	3007	260	1919
11	2700	836	16	185	2885	249	2168
12	2750	836	0	0	2750	237	2405
13	2700	826	—10	—116	2584	223	2628
14	2660	816	—10	—116	2544	220	2848
15	2590	810	—6	—70	2520	217	3065
16	2560	802	—8	—93	2467	213	3278
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
33	1070	463	—13	—150	920	79	5497
34	978	428	—35	—405	573	49	5546
35	920	382	—46	—533	387	33	5579

Очевидно, объемы половодья по входному и выходному гидрографам при незначительном $Q_{пр}$ должны быть практически равны. При наличии существенной разницы в этих объемах следует проверить приращения русловой емкости и по сомнительным интервалам времени внести исправления.

Расчеты ретрансформации имеют широкое применение также и в случаях определения боковой приточности, при восстановлении паводковых и годовых гидрографов, выявлении притока в озеро по гидрографам вытекающей реки и объемам озера и т. п. [59]. В последнем случае восстановленный приток в озеро учитывает потери из него [см. формулу (135)]. Поэтому в водохозяйственных расчетах по найденному притоку при реконструкции озера потери должны учитываться лишь с разницы площадей зеркала —

проектируемой и прежней. Соответственно располагаемый приток уменьшится на величину потерь с приращения площади или увеличится, если площадь озера намечено сократить.

О потерях на испарение с площади приращения (или уменьшения) зеркала см. в § 8.

Наряду с русловым регулированием в жизни рек наблюдается также природное грунтовое регулирование стока объемами рыхлых или трещиноватых горных пород, слагающих русло, пойму реки и берега долины. Это так называемое *береговое* регулирование [63]. Особо заметно оно проявляется во время половодья. При подъеме уровня воды в реке значительные массы ее уходят в берега, на насыщение аллювия и более отдаленных объемов грунта, а при спаде и после него, в межень, эти грунтовые воды поступают в русло.

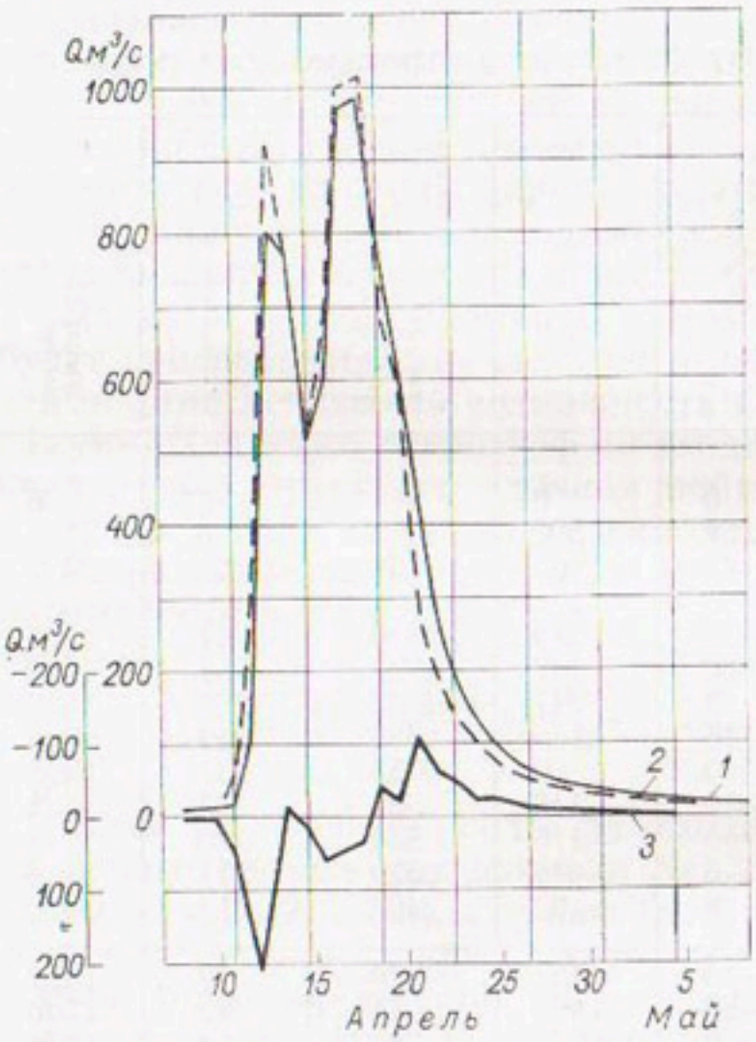


Рис. 113. Влияние берегового регулирования речного стока в бассейне Северского Донца у с. Огурцово в половодье 1963 г.

1 — фактический гидрограф, *2* — гидрограф притока воды с исключением берегового регулирования, *3* — изменение расходов берегового регулирования.

По данным О. В. Попова [90], береговое регулирование стока в верховьях Северского Донца у с. Огурцово (водосбор 5540 км²) снизило максимальный расход первого пика высокого половодья 1963 г. с 915 до 800 м³/с (рис. 113). Величина снижения по отношению к наблюденному первому пику составила 14%.

Л. Т. Федоровым [128] для участка р. Оки от г. Касимова до г. Мурома умело разделены русловое и береговое регулирование, что ценно в методическом и практическом смысле. Эти явления рассмотрены Л. Т. Федоровым по пятидневкам в половодье, декадам в начале межени и далее по месяцам для замкнутых годовых циклов всего 14-летнего периода.

Срезка максимумов при береговом регулировании на участке, например, в многоводном 1963 году составила 14%, причем расход упал с 8186 до 7170 м³/с. Наибольшие утечки в грунт отмечены в начале резкого подъема уровня воды в реке. Пик обычно насту-

шает позже максимума грунтовых потерь, причем русловая трансформация половодья к этому времени не срезает расход, а начинает увеличивать его.

За год в целом инфильтрация и отдача из грунта обычно не балансируются. В многоводные годы среднегодовая отдача отрицательна (до —52 м³/с), так как не вся просочившаяся в грунт вода успевает возвратиться в реку. В маловодные годы отдача из грунта превышает утечки, т. е. происходит сработка запасов грунтовых вод до +72 м³/с в среднем за год.

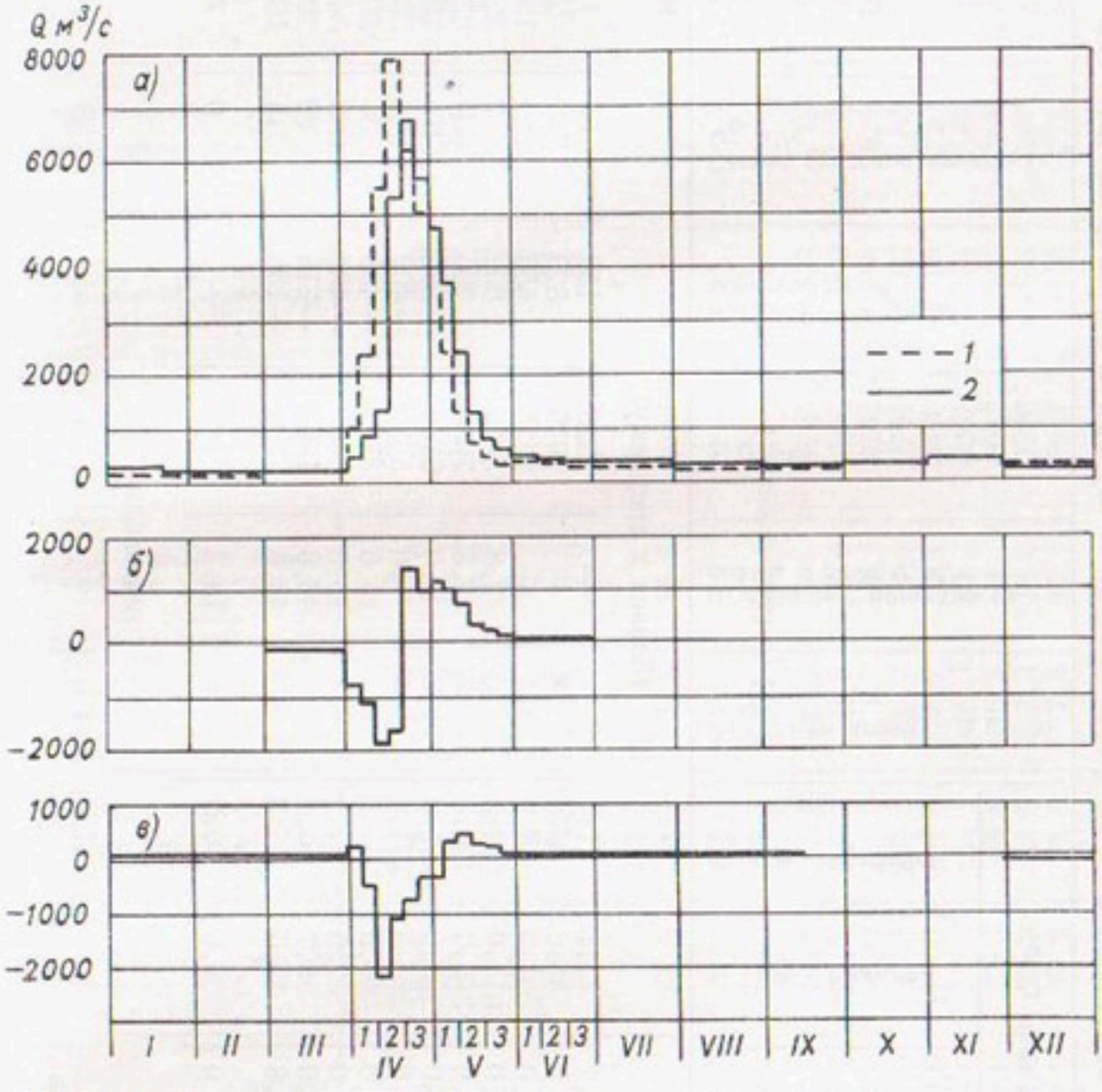


Рис. 114. Водный баланс р. Оки на участке Касимов — Муром за 1940 г.

а — гидрографы у Мурома: восстановленный (*1*) и наблюденный (*2*); *б* — изменение русловой емкости; *в* — водообмен с грунтом.

Изложенное иллюстрируется рис. 114 и табл. 93, заимствованными из работы [128]. Таким образом, береговое регулирование может оказывать заметное влияние на формирование максимальных расходов в период половодья, на внутригодовой ход стока, на водный баланс водохранилищ, который должен составляться с учетом этого явления. В соответствующих случаях оно должно учитываться при контроле результатов гидрометрических работ по разным створам и в расчетах речного стока.

Таблица 93

Водный баланс р. Оки на участке от г. Касимова до г. Мурома за характерные 1940, 1953 и 1954 годы

Дата (период)	Расход воды Q м³/с				Осадки на пойму и в русло Q м³/с	Испарение с поверхности поймы и реки Q м³/с	ΣQ м³/с	Изменение русловой емкости, 10^6 м³	Расход русловой емкости $Q_р$ м³/с	$\Sigma Q - Q_р$ м³/с	Расход воды р. Оки у Мурома Q м³/с	Водоотдача из грунта (+) и в грунт (—) $Q_{гр}$ м³/с
	р. Ока у Касимова	р. Мокша у Шевелевского	р. Ца у Княжева	неучтенная приточность								
1940 г. (близок к среднему)												
1—31 III	185	20,1	11,1	11,7	—	—	228	152	57	171	223	52
1—5 IV	719	87,6	85,6	90,0	36,8	—	1019	329	762	257	434	177
6—10 IV	1376	321,0	301,0	316,0	61,1	—	2375	459	1062	1313	820	—493
11—15 IV	3076	773,0	613,0	644,0	317,0	2,8	5420	802	1857	3563	1344	—2219
16—20 IV	5884	1218,0	386,0	405,0	63,5	2,8	7954	706	1634	6320	5258	—1062
21—25 IV	4734	833,0	283,0	297,0	19,8	7,0	6159	—592	—1370	7529	6758	—771
26—30 IV	4078	560,0	184,0	193,0	19,8	7,0	5028	—400	—926	5954	5616	—338
1—5 V	3416	308,0	90,6	95,1	0	15,6	3894	—488	—1130	5024	4700	—324
6—10 V	2184	133,0	52,6	55,2	0	15,6	2409	—432	—1000	3409	3720	311
11—15 V	1218	78,9	28,7	30,2	0	46,6	1309	—315	—729	2038	2454	416
16—20 V	679	58,8	14,6	15,3	0	44,8	722	—136	—315	1037	1290	253
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Среднее за год	564	77,0	38,6	40,5	19,6	13,4	726	—	0	726	709	—17
1953 г. (многоводный)												
1—5 IV	1585	186	253,0	266,0	144,0	—	2434	619	1433	1001	1160	159
6—10 IV	4970	665	1243,0	1306,0	172,0	—	8356	1220	2824	5532	2250	—3282
11—15 IV	6170	1140	705,0	740,0	15,5	1,7	8769	779	1803	6966	5700	—1266

Дата (период)	Расход воды Q м³/с				Осадки на пойму и в русло Q м³/с	Испарение с поверхности поймы и реки Q м³/с	ΣQ м³/с	Изменение русловой емкости, 10^6 м³	Расход русловой емкости $Q_р$ м³/с	$\Sigma Q - Q_р$ м³/с	Расход воды р. Оки у Мурома Q м³/с	Водоотдача из грунта (+) и в грунт (—) $Q_{гр}$ м³/с
	р. Ока у Касимова	р. Мокша у Шепелевского	р. Цна у Княжева	неучтенная приточность								
16—20 IV	4930	1380	302,0	317,0	15,5	1,7	6943	—529	—1225	8186	7170	—1016
21—25 IV	3565	1040	169,0	178,0	33,5	23,0	4962	—816	—1889	6851	5720	—1131
26—30 IV	2325	662	65,1	68,4	33,8	23,3	3127	—679	—1572	4699	4240	—459
1—5 V	1650	349	48,0	50,4	101,0	8,3	2190	—389	—901	3091	3190	99
6—10 V	1300	207	50,7	53,2	101,0	8,3	1704	—124	—287	1991	2250	259
11—15 V	1250	195	55,3	58,0	28,4	7,3	1574	—81	—188	1762	1918	156
16—20 V	990	138	54,3	57,0	28,4	7,0	1256	—88	—204	1460	1565	105
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Среднее за год	790	108	51,5	54,1	29,4	15,5	1018	—	—7,0	1025	993	—32
1954 г. (маловодный)												
1—31 III	222	17,3	14,8	15,5	25,2	—	295	128	48	247	295	48
1—5 IV	634	158,0	101,0	106,0	3,5	6,6	996	249	576	420	588	168
6—10 IV	1460	383,0	206,0	216,0	3,1	6,2	2262	268	820	1442	1253	—189
11—15 IV	2046	327,0	192,0	202,0	25,7	2,1	2791	36	83	2708	2475	—223
16—20 IV	2840	316,0	117,0	123,0	25,7	2,1	3420	95	220	3200	3238	38
21—25 IV	2880	263,0	52,5	55,1	16,3	0	3267	—105	—243	3510	3476	—34
26—30 IV	2392	198,0	37,0	38,8	16,3	0	2682	—166	—384	3066	3406	340
1—5 V	1956	115,0	29,2	30,6	7,3	18,0	2120	—138	—319	2439	2814	375
6—10 V	1476	89,0	27,2	28,6	7,3	17,7	1611	—118	—273	1884	2130	246
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Среднее за год	499	45,7	22,4	23,2	19,9	10,7	600	—	4,0	596	640	44

Особенно существенна роль берегового регулирования на тех участках рек с широкими поймами, на которых дополнительная приточность невелика. Подобные участки служат в основном для транзитного отвода стока. Таковы Северский Донец ниже устья р. Оскола, Волга ниже г. Саратова и др.

В реках пустынь преобладают безвозвратные утечки в грунт. Например, р. Амударья на участке длиной 625 км (от г. Керки до с. Таш-Сака) в половодье за май и июнь 1951 г. теряла 250—350 м³/с, а в среднем за тот же год 50 м³/с, что было равно отбору воды на орошение.

Береговое регулирование проявляется индивидуально для каждого участка любой реки и зависит от мощности аллювия, его геотехнических свойств, площади поймы, высоты грунтовых вод в ней, ее теплового режима (промерзание или оттаивание к началу половодья), наличия перекатов и т. д.

Регулирование стока в грунтах прибрежной зоны наблюдается также при искусственных попусках воды из водохранилищ.

Отметим попутно, что наблюдаемое в ряде случаев истощение малых рек в многолетнем разрезе объясняется нередко именно разной степенью берегового регулирования: наличием плотин, запруд, мельниц в одно время и отсутствием их в другое, когда река в течение каждого года, за исключением периодов кратковременных паводков, дренирует влагу своего бассейна или вовсе прекращает водообмен с грунтом в результате занесения реки при усиленной прибрежной эрозии (при распашке пойм).

§ 44. ПОСТРОЕНИЕ ГИДРОГРАФОВ ВЫСОКИХ ВОД

Известно, что гидрографы годового стока, в том числе и гидрографы высоких вод, в деталях неповторимы, т. е. отличаются многими элементами, к которым относятся объем стока, максимальный расход, длительность подъема и спада, накладывание второстепенных паводков и т. п.

Вследствие большого числа указанных элементов и их возможных комбинаций нельзя точно установить гидрограф, соответствующий заданной обеспеченности. Поэтому под норматив обеспеченности стремятся подвести лишь решающие признаки — максимальный расход $Q_м$ и суммарный приток $\sum Q$. Для гидрографов, подлежащих трансформации, принято следующее:

1) при незначительной срезке $Q_м$ критерий обеспеченности относится к величине $Q_м$;

2) при регулировании гидрографа в течение всей его продолжительности обеспеченность относится к объему $\sum Q$;

3) в промежуточных случаях критическим является объем некоторой части волны.

Поскольку в практике большей частью встречаются последние случаи (п. 3), то обычно гидрографы строят таким образом, чтобы заданной обеспеченности удовлетворяли по возможности оба ре-

шающих признака — $Q_м$ и $\sum Q$ (этого легко достичь, если гидрограф строится по методу, при котором $Q_м$ и $\sum Q$ могут устанавливаться независимо друг от друга).

Совмещение в одном гидрографе обеспеченных величин $Q_м$ и $\sum Q$ возможно для снеговых половодий на значительных реках, по которым при больших половодьях наблюдается довольно тесная связь между высотой пика и объемом притока.

Половодья и в особенности ливневые паводки с малых водосборов отличаются разнообразием очертаний гидрографов. При этом сочетание в одном гидрографе большого объема притока и высокого пика необязательно.

По предложению С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля [61], соответствующие друг другу элементы $Q_м$ и $\sum Q$ могут быть установлены следующим образом. Основная из этих величин, имеющая для расчета решающее значение (см. пп. 1 и 2), исчисляется соответственно заданной обеспеченности, другая определяется по корелятивной связи между ними.

Для малых и средних рек $Q_м$ и $\sum Q$ определяются часто независимо друг от друга для одной и той же обеспеченности, а затем по этим двум элементам вычерчивается расчетный гидрограф с использованием принятой для него схемы-модели или уравнения гидрографа [121]. Такое сочетание $Q_м$ и $\sum Q$ дает запас в расчетах.

В качестве расчетных схем гидрографа допускаются следующие.

Конфигурация наблюденного гидрографа высоких вод. Эта схема применяется при наличии длительного ряда гидрометрических наблюдений на данной реке, позволяющего проанализировать и выбрать в качестве модели гидрограф высоких вод редкой повторяемости по решающему признаку.

Для перехода к расчетному гидрографу вычисляются переходные коэффициенты: для ординат гидрографа $K_1 = Q_м : Q_ф$, для абсцисс $K_2 = (\sum Q : \sum Q_ф) \cdot (Q_ф : Q_м)$. Здесь $Q_м$ и $Q_ф$ — максимальные расходы, обеспеченный и фактический по гидрографу-модели; $\sum Q$ и $\sum Q_ф$ — максимальные объемы притока, обеспеченный и фактический по гидрографу-модели.

Для приведения к расчетному гидрографу все ординаты модели умножаются на коэффициент K_1, а абсциссы — на K_2.

Подобные приведения гидрографов (с последующей их ретрансформацией) в ответственных случаях желательно выполнять по нескольким гидрографам, близким к расчетному по обеспеченности решающего признака. За окончательный принимается приведенный гидрограф, наиболее неблагоприятный по величине сбросного расхода или по высоте форсировки уровня водохранилища.

При отсутствии длительных наблюдений на исследуемой реке очертание и основные соотношения в гидрографе подобно вышеизложенному определяются по реке-аналогу или по теоретическим схемам гидрографов высокого стока.

Для очень малых обеспеченностей (0,1 и 0,01%), принимаемых за норматив для крупных сооружений, трудно подобрать из гидрометрических рядов гидрограф, близкий по обеспеченности к расчетному. В таких случаях необходимы специальные исследования сочетаний факторов высокого стока, наиболее редких по повторяемости, которые в совокупности могут вызвать такое половодье, превышение которого физически нереально.

Теоретические схемы гидрографов. Простейшей из этих схем является треугольник, причем гидрограф вычерчивается по двум элементам ($Q_м$ и $\sum Q$), с которыми длительность T гидрографа (основание треугольника) связана соотношением $T=2\sum Q : Q_м$. В этой схеме максимальный расход равен удвоенному среднему расходу гидрографа.

Общая длительность волны T по фазам подъема t и спада t_1 обычно принимается по соотношению их $t : t_1$ в пределах от 1 : 2—2,5 для малых рек до 1 : 2,5—3,0 для значительных рек.

Если на пике гидрографа, судя по гидрометрическим данным, наблюдается слабое изменение расходов в течение некоторого более или менее существенного интервала времени, то за схему гидрографа принимают трапецию.

Трапецеидальный гидрограф по сравнению с треугольным дает более осторожное решение по срезке пика или трансформации, так как с увеличением длительности стояния максимума требуется повышение максимального горизонта или увеличение размеров водосброса.

Треугольные и трапецеидальные гидрографы применяются в проектах небольших сооружений: первые большей частью для ливневых паводков, вторые для снеговых.

Схематизации гидрографов удовлетворяет также известная в математике биноминальная кривая распределения вероятностей (обычно типа III), удачно передающая общий характер хода расходов во время половодья или паводка, а также принятая в Указаниях [121] кривая Гудрича. Для построения гидрографа по этим кривым требуются величины $Q_м$, $\sum Q$ и t. О выборе $Q_м$ и $\sum Q$ для обеспеченных гидрографов изложено выше. Длительность фазы подъема t устанавливается по наблюдениям на изучаемой реке и на реках-аналогах или по эмпирическим зависимостям. Например, по формуле С. Н. Боголюбова [17]

$$t=t_0+\frac{L}{\lambda}, \qquad (136)$$

где t_0 — продолжительность снеготаяния в сутках со дня с максимальной убылью снега, равная 4,0 суткам для рек центрального района ЕТС и 1,5—2,0 суткам для степных районов Предкавказья и Заволжья (для рек с заболоченными бассейнами $t_0=6$ суткам); L — длина водотока в км; λ — скорость течения во время пика половодья, принимаемая равной от 56 км/сут. (0,64 м/с) для заболоченных рек до 108 км/сут. (1,25 м/с) для обычных равнинных рек.

Построение гидрографа по биноминальной кривой упрощается применением номограмм С. И. Рыбкина [104], а по Гудричу,— таблиц [121].

А. В. Огиевским [74] в качестве модели для гидрографов предложен *обобщенный процентный гидрограф*. Сущность его состоит в том, что в принятом масштабе по оси ординат откладываются расходы гидрографа в процентах от максимального, принимаемого за 100, а по оси абсцисс — время от начала гидрографа в процентах от всей его продолжительности, равной 100. В таких координатах перестраиваются несколько выдающихся фактических гидрографов (два—четыре) и из полученных выбирается обобщенный процентный гидрограф, более осторожный для расчета трансформации. В этот гидрограф входят выбранные расчетные $Q_м$ и $\sum Q$ из соотношений:

для расходов (в м³/с)

$$Q_i = \frac{Q_м}{100} z_i;$$

для времени (в сутках)

$$t_i = \frac{0{,}00116 \sum Q}{n Q_м} s_i,$$

где $\sum Q$ дано в м³; $Q_м$ и Q_i — в м³/с; n — число условных единиц площади обобщенного процентного гидрографа, определяемой планиметрированием (например, $n=2917$); z_i и s_i — ординаты и абсциссы обобщенного гидрографа в процентах.

Известна также схема построения гидрографов С. Н. Боголюбова [17], в которой, как отмечено, параметры продолжительности волны высоких вод связываются с длиной реки.

Проектирование гидрографа, по Д. Л. Соколовскому [112], производится по уравнениям параболических кривых:

для подъема

$$Q_x = Q_м \left(\frac{x}{t}\right)^m;$$

для спада

$$Q_z = Q_м \left(\frac{t_1 - z}{t_1}\right)^n,$$

где Q_x и Q_z — расходы на подъеме и на спаде; t — продолжительность подъема в сутках для половодья [например, по формуле (136)] и в часах для паводков ($t = L : 3{,}6\lambda$); t_1 — продолжительность спада: $t_1 = \gamma t$, причем для весенних половодий $\gamma = 2{,}0$, за исключением рек со значительными поймами, для которых $\gamma = 3{,}0$, для ливневых паводков $\gamma = 2{,}0$ для малых речек и логов, $\gamma = 2{,}5 \div 3{,}0$ для средних рек с обычными поймами и $\gamma = 4{,}0$ для больших рек со значительными поймами; x — номер дня (часа) от начала высокого стока; z — то же от пика; m и n — показатели степени парабол, для весеннего половодья $m = n = 2$, для дождевых паводков $m = 2$, $n = 3$.

Д. Л. Соколовский составил таблицу текущих координат гидрографа, вычерчивание которого производится по данным $Q_м$, t и γ. Планиметрируя его, получаем величину $\sum Q$.

Рассуждения о всех теоретических схемах относятся к гидрографам поверхностного стока. К ординатам последних следует добавить расход грунтового стока, определяемый путем срезки фактически наблюденных гидрографов на рассматриваемой реке или реке-аналоге.

Гидрографы без строго фиксированной формы (для практически полной аккумуляции высоких вод). При выборе обеспеченных графиков интенсивного стока, как отмечено выше, должны учитываться также и конкретные условия пропуска половодий или паводков.

В некоторых случаях конфигурация гидрографа не имеет почти никакого значения. Таковы примеры строительных работ с временной аккумуляцией за перемычкой обеспеченного паводка (с последующим перепуском воды малыми расходами по специальному лотку). К таким же случаям относится так называемое полное регулирование высокого стока. Примером его является аккумуляция системой водохранилищ на р. Саксагани (Криворожье) очень высоких половодий и паводков с последующим (в определенной очередности) перепуском воды из водохранилищ в р. Ингулец (по тоннелю из нижнего водоема). Система упомянутых водоемов защищает от речного стока открытые рудоразработки на устьевом участке р. Саксагани, за пределами нижнего водохранилища. Эти водохранилища наряду с полным выравниванием максимальных половодий и паводков выполняют также водохозяйственное регулирование стока для заданного водопотребления.

Для таких и аналогичных условий требуется определить обеспеченный объем стока $\sum Q$ и при необходимости найти максимальный расход $Q_м$, соответствующий этому объему, без строгой увязки их в гидрографе. Например, применительно к ливневым паводкам этот вопрос решается следующим образом.

В каждом году за ливневый сезон выбирается по одному случаю с максимальным суточным количеством осадков h. Членов ряда будет столько же, сколько лет наблюдений за осадками. При этом имеется в виду, что максимальное суточное количество осадков выпадает обычно в виде интенсивного дождя или ливня и не обязательно в течение целых суток.

Для полученного ряда устанавливаются среднее h_0, коэффициенты вариации C_v и асимметрии C_s. По найденным параметрам определяются обеспеченные осадки h_P. Можно найти и соответствующую им продолжительность ливня в минутах $t_л$ по формуле Г. А. Алексеева (при известных географических параметрах A и B [112])

$$t_л = \left(\frac{h_P}{A + B \lg \frac{100}{P}} \right)^3 . \qquad (137)$$

В необходимых случаях следует учитывать редукцию осадков [93].

Суммарный приток определяется по формуле

$$\sum Q = 1000 h_P \alpha F \text{ м}^3, \qquad (138)$$

где h_P выражено в мм; F — в км², α — коэффициент стока, для равнинных бассейнов с рыхлыми грунтами он приближенно определяется по табл. 94. Следует иметь в виду тенденцию к увеличению α с увеличением $t_д$.

Таблица 94

Величина α и λ (с учетом данных Д. Л. Соколовского и Л. Л. Лиштвана)

P %	α	λ м/с	P %	α	λ м/с
50	0,02—0,04	0,4—0,6	1,0	0,25—0,30	1,5—1,7
10	0,10—0,15	1,0—1,2	0,1	0,35—0,40	2,0 и более

Для построения гидрографа находится время добегания в минутах

$$t_д = \frac{1000L}{60\lambda},$$

где L — длина тальвега от наиболее удаленной точки бассейна до замыкающего створа в км; λ — средняя по длине реки скорость добегания волны паводка в м/с. Практически для малых равнинных рек скорости добегания при паводках принимаются по табл. 94.

В реальных условиях сложные очертания водосбора, разнообразие его геоморфологических, гидрографических и почвенных особенностей, а также изменяемость коэффициента стока в течение ливня приводят в совокупности к тому, что гидрограф паводка в замыкающем створе приобретает криволинейную конфигурацию даже при постоянной интенсивности дождя.

Поскольку обеспеченный объем стока от дождя (ливня), определяемый независимо от $t_л$, $t_д$ и $Q_м$, может не соответствовать по обеспеченности своему пиковому расходу (большой обеспеченный приток за продолжительное время и потому при малом расходе), гидрографы и расходы, имеющие для таких случаев второстепенное значение, при необходимости определяются по следующим схематическим соотношениям.

Если $t_л < t_д$, то подъем паводка остановится с прекращением дождя, и гидрограф будет приближаться к трапецеидальной форме, поскольку после прекращения дождя расход в замыкающем створе будет оставаться более или менее постоянным (для условной схемы) до тех пор, пока вода не дойдет с самого отдаленного

элемента площади, после чего начнется спад. В результате максимальный расход (высота трапеции) будет равен

$$Q_м = \frac{2\sum Q}{60\,[2t_д + (\gamma - 1)\,t_л]}. \qquad (139)$$

Если $t_л > t_д$, то к замыкающему створу за время $t_л - t_д$ поступает вода со всего водосбора, и в это время расход условно постоянен. Затем начинается спад. Для такого случая

$$Q_м = \frac{2\sum Q}{60\,[2t_л + (\gamma - 1)\,t_д]}. \qquad (140)$$

После определения расхода, проконтролировав величину λ, получим по ней значение $t_д$ и тем самым окончательно уточним расход по вышеизложенному.

Очевидно, при $t_л = t_д$ гидрограф имеет треугольную форму, и расход определяется по любой из формул (139) и (140) и будет иметь большее значение, чем в случаях, когда $t_л \neq t_д$.

Скорость и время добегания можно уточнить, пользуясь кривой $\lambda = \varphi(Q)$ хотя бы в замыкающем створе, если здесь характер течения мало отличается от такового на среднем участке выше замыкающего створа. При наличии характерного гидрометрического створа на среднем участке или несколько ниже гидравлические данные по этому створу также можно использовать для контроля $t_л$ и $t_д$. Упомянутая схема контроля $t_л$ и $t_д$, применимая также при расчете $Q_м$, по Д. Л. Соколовскому, является несколько условной, поскольку скорости течения и добегания волны практически равноценны лишь для сухих логов и малых рек с небольшой предпаводочной емкостью воды в русле.

Из приведенного видно, что для коротких водосборов, отличающихся высокими модулями ливневого стока при небольшом по объему суммарном стоке (когда $t_л = t_д$), возможны значительные объемы стока от более продолжительных дождей ($t_л > t_д$) при сравнительно небольших максимумах расходов. При дождях с продолжительностью $t_л < t_д$, хотя и охватывающих весь водосбор до замыкающего створа, не только расходы, но и объем стока меньше соответствующих величин для $t_л = t_д$.

Подробнее расчеты высокого стока изложены в работах [23, 93, 112, 121 и др.].

Согласно изложенному, в условиях малых рек выделяются три расчетных случая максимального стока:

1) максимальные снеговые обеспеченные расходы, рассматриваемые обычно в совокупности с обеспеченными или соответствующими им (по корреляционной связи) объемами стока;

2) максимальные ливневые обеспеченные расходы с соответствующими им объемами стока;

3) максимальные ливневые (дождевые) обеспеченные объемы стока с соответствующими им расходами.

Поскольку в первом случае расходы на юге обычно меньше, а сток значительно больше соответствующих элементов ливневых

паводков (второй случай), оба случая, соответственно конкретным условиям, должны быть проверены по эффекту срезки максимумов при трансформации половодий и паводков водохранилищем. Третий случай исследуется в схемах со значительной (или полной) аккумуляцией обеспеченного стока паводка.

§ 45. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЛОВОДИЙ И ПАВОДКОВ ВОДОХРАНИЛИЩЕМ

Эффект регулирования высоких вод водохранилищем определяется в зависимости от важности сооружения и от конкретных условий: топографической и гидравлической изученности водотока, высоты подпора, характера чаши водоема и т. п.

Существуют следующие три приема расчета трансформации гидрографа высоких вод при их прохождении через водохранилище: 1) расчет перемещения волны паводка вдоль водохранилища по методам неустановившегося движения; 2) то же с упрощениями — с использованием зависимости объема водохранилища от расхода воды в реке и от уровня у плотины (расчет по динамическим емкостям со схематизацией форм свободной поверхности); 3) определение величины срезки пика без учета речной гидравлики и с использованием зависимости объема водохранилища только от уровня верхнего бьефа (расчет по статическим емкостям).

Ниже рассматривается каждый из этих приемов.

Расчеты по законам гидравлики неустановившегося движения [1]

Ход паводочной волны через водохранилище и ее трансформация при этом рассчитываются на основе совместного решения двух уравнений — динамического равновесия и неразрывности.

Уравнение динамического равновесия, определяющее уклон свободной поверхности, необходимый в каждый момент для соблюдения равновесия между силами движения потока и силами сопротивления ему, имеет вид

$$Q=fC\sqrt{hi} \quad \text{или} \quad Q=K\sqrt{i}.$$

Здесь i — уклон водной поверхности; h — средняя глубина, для широких потоков практически равна гидравлическому радиусу, м; Q — расход воды, м³/с; f — площадь живого сечения, м²; C — коэффициент, характеризующий состояние русла, определяется по одной из эмпирических формул Павловского, Маннинга и т. п.; $K=fC\sqrt{h}$ — модуль расхода воды, или пропускная способность русла.

---

[1] Эти расчеты и связанные с ними обозначения аналогичны таковым в § 33. Здесь приводятся лишь некоторые дополнения соответственно специфике задачи.

Уравнение неразрывности выражает для рассматриваемого участка реки и любого интервала времени точную балансовую связь между объемами воды: а) поступающей на участок $v_п$; б) вытекающей из него $v_у$ и в) заполняющей русло Δv, или $v_п - v_у = \Delta v$.

Упомянутые уравнения представляются в виде особых для каждого участка зависимостей:

$$\frac{K_{ср}}{\sqrt{l}} = \varphi(Z', Z'') \quad \text{и} \quad v = \varphi(Z_{ср}).$$

Зависимость для емкости участка выражает связь между объемом воды v в русле участка и средним уровнем воды $Z_{ср}$, равным полусумме уровней по концам участка.

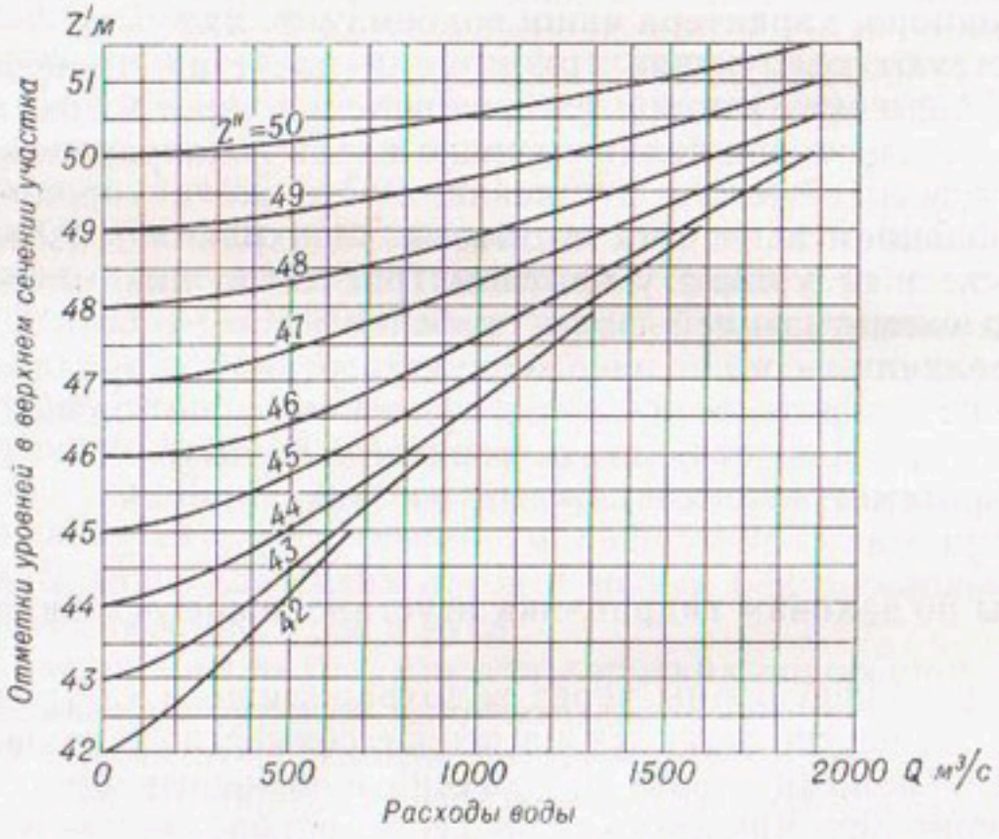


Рис. 115. Зависимость $Q = \varphi(Z', Z'')$.

Зависимость для $K_{ср}$ связывает пропускную способность русла с уровнями воды на концах участка длиной l.

Если $\Delta Z = Z' - Z''$, а $i = \Delta Z : l$, то расход на участке в какой-либо момент равен

$$Q_{ср} = \frac{K_{ср}}{\sqrt{l}} \sqrt{\Delta Z}.$$

Эта зависимость использована в виде уравнения (74) в § 33. Порядок расчетов, изложенных в § 33, остается таким же и при расчете пропуска высоких вод, для которого целесообразно ввести лишь некоторые изменения соответственно иной постановке задачи.

В частности, упомянутая зависимость для $Q_{ср}$ изображается в виде номограммы $Q = \varphi(Z', Z'')$, отдельной для каждого участка водохранилища. Вид ее для одного из участков показан на рис. 115.

В качестве уравнения неразрывности используется формула (75).

При расчете длина реки от входного створа до плотины разделяется на участки, а продолжительность паводка у входного створа — на одинаковые интервалы Δt. Длительность интервалов и размеры участков назначаются такими, чтобы без существенных погрешностей допускалась линейная интерполяция характеристик гидравлического режима в течение каждого интервала и в пределах каждого участка (для половодий интервал составляет 1—2 суток и более, для паводков — 1—2 ч и более).

Границы участков назначаются в местах перелома уклонов водной поверхности, причем падение уровня на участке не следует допускать более 0,5—1,0 м. Желательно, чтобы участки выделялись с однотипными поверхностями зеркала воды в пределах колебания уровней (для линейности емкостных характеристик вдоль каждого участка). Принимается во внимание также расположение гидрометрических пунктов, имеющих кривые $Q=\varphi(Z)$. Опираясь на эти пункты и пользуясь графиками связи уровней, упомянутые кривые опорных пунктов переносятся во все створы — границы участков. Чем больше участков, тем более точен, но и более трудоемок расчет.

В расчете принимается, что к началу половодья расходы и уровни по всем створам от входного створа до плотины являются известными и установившимися. Также известно поступление расходов к входному створу (расчетный гидрограф) и режим пропуска расходов через плотину.

Для конца первого интервала на гидрографе определяется расход $Q'_к$, по которому из уравнения (75) находится для первого участка $Б=Q_к^{ср}+\frac{v_к}{\Delta t}$. Далее задаемся возможным значением $Z'_к$ и подбираем для него отметку $Z''_к$. Емкость русла $v_к$, соответствующая отметке $Z_{ср}=(Z'+Z'') : 2$, должна быть такой, чтобы при исключении из суммы $Б$ величины $\frac{v_к}{\Delta t}$ остался расход $Q_к^{ср}$, точно удовлетворяющий отметкам $Z'_к$ и $Z''_к$ по графику $Q=\varphi(Z', Z'')$ для первого участка. По найденному значению $Q_к^{ср}$ определяется $Q''_к (Q''_к=2Q_к^{ср}-Q'_к)$.

Таким путем для одной и той же суммы $Б$ задается несколько $Z'_к$ и подбираются соответствующие им $Z''_к$ и $Q''_к$.

Затем строятся кривые $Q''_к=\varphi(Z')$ и $Q''_к=\varphi(Z'')$.

Далее для нескольких пар $Z''_к$ и $Q''_к$ первого участка, являющихся начальными $Z'_к$ и $Q'_к$ для второго участка, аналогично находятся возможные пары $Z''_к$ и $Q''_к$ второго участка и т. д. (при этом для каждой пары соответствует своя величина $Б$).

Таким образом, для одного интервала времени просчитываются все участки. Окончательные величины Z и Q, связанные по

всем створам друг с другом, определятся заданными (плановыми) или функционально связанными значениями Z и Q на плотине. Если, например, здесь имеется кривая пропускной способности водосбора, дающая однозначную зависимость между расходами и уровнями (независимо от отметок на противоположном конце участка), то, совмещая кривую $Q''=\varphi(Z'')$ с кривой пропускной способности, находим действительную отметку и расход в нижнем сечении нижнего участка; для того же расхода сразу определяется и отметка Z'. Поскольку Z' этого участка есть Z'' предыдущего участка, то тем самым находятся действительные Q'', Z'', а значит, и Z' предыдущего участка и т. д.

Рассчитанные характеристики в конце интервала одной гидравлической цепи являются исходными (начальными) для следующей гидравлической цепи. Расчет продолжается до получения всего сбросного гидрографа на плотине или до момента, когда на этом гидрографе обнаружится, что сбросной максимум пройден и начался спад.

Из приведенного видно, насколько громоздким является расчет сбросных расходов по методу неустановившегося движения. Поэтому даже в самых ответственных случаях расчет сбросных расходов и выбор размеров водосброса производятся по одному из вариантов расчета. Остальные варианты освещаются при расчетах по более упрощенной методике с введением корректива, который удается установить из сопоставления точного расчета с упрощенным.

Расчеты по динамическим кривым объемов водохранилища

В водохранилище с высокой плотиной на ближайшем к ней участке уклон свободной поверхности настолько незначителен при пропуске любых расходов (даже максимальных сбросных), что она может практически приниматься горизонтальной.

При этом очертание кривых свободной поверхности (кривых подпора) и объемы водохранилища представляются в зависимости от уровня воды у плотины и расхода во входном створе.

Кривые подпора строятся для нескольких расходов и применительно к условиям пропуска паводка через плотину. При этом расходы по всей длине водохранилища принимаются постоянными (если на участке подпора нет значительных притоков).

Таким образом, во многих случаях полное решение динамического уравнения без существенного нарушения точности расчета удается заменить применением кривых подпора без подробной увязки гидравлических цепей по элементарным участкам.

В результате расчет трансформации волны половодья водохранилищем сводится к решению уравнения неразрывности, т. е. к простейшему балансированию объемов воды, поступающей, задержанной и сброшенной.

Объем задержанной воды — трансформирующая емкость — определяется по кривым объемов (построенным для участков водо-

хранилища) для отметок воды (на серединах участков), определяемых по кривым подпора.

Для упрощения расчета можно предварительно построить номограмму динамических емкостей, по которой решение уравнения неразрывности выполняется без специального построения для каждого расчетного случая индивидуальных кривых подпора.

Если отметка гребня плотины незначительно превышает отметку естественного подъема уровня рассматриваемого половодья или паводка, то за расчетный для каждого момента времени, по предложению Я. Д. Гильденблата, принимается объем бьефа, средний между объемами по номограмме для входного Q' и сбросного Q'' расходов. Этим самым учитываются изменения емкости приплотинного участка, которые в упомянутых случаях (при не вполне горизонтальной поверхности воды на этом участке и широко разливающемся водохранилище) могут быть существенными.

Построение динамических кривых объемов обычно производится для водосборов со щитами и с регулируемым пропуском паводков. При наличии таких водосбросов и в условиях регулирования паводков, например для гидроэлектростанций, когда большинство высоких расходов пропускается при НПГ, кривые динамических емкостей строятся следующим образом.

1. По каждой из двух отметок верхнего бьефа у плотины — для НПГ и катастрофического высокого уровня — строят кривые подпора по ряду естественных максимальных расходов (без трансформации), представляющих интерес (обычно для нескольких из следующих обеспеченностей: 50; 3; 2; 1; 0,5; 0,1%, а для железнодорожных мостов, кроме того, 0,3%).

2. Весь участок реки от плотины до входного створа (наиболее отдаленного места выклинивания всех кривых подпора, включая кривую подпора меженных расходов при НПГ) разбивается на несколько участков створами, перпендикулярными общему направлению потока в паводок.

3. Для каждого участка путем планиметрирования площадей между горизонталями строятся статические кривые площадей и объемов.

4. По полученным статическим кривым объемов определяются динамические объемы. При НПГ у плотины и для расхода с обеспеченностью, например, 50% находят соответствующую кривую подпора и ее отметки на середине каждого из участков (за пределами выклинивания подпора для середины участков принимаются естественные уровни той же обеспеченности). По этим отметкам снимаются объемы с соответствующих статических кривых. Суммированием полученных объемов определяем динамическую емкость у плотины при расходе обеспеченностью 50%. Таким же образом по кривой подпора для того же расхода, но при наивысшем уровне у плотины находим динамическую емкость соответственно этому наивысшему уровню.

5. Имея суммарную (для всех участков) кривую статических объемов, наносим в тех же координатах полученные две точки

динамических объемов при рассмотренном расходе ($P=50\%$). Эти точки соединяются кривой (или почти прямой линией), следуя общему направлению суммарной кривой статических объемов в пределах двух (принятых как минимум для сокращения работы) отметок. Аналогично изложенному строятся динамические кривые для других максимальных расходов. Величины расходов надписываются на кривых (рис. 116).

При открытом водосбросе с отметкой гребня или порога на уровне НПГ форсировка уровней начинается сразу же с превыше-

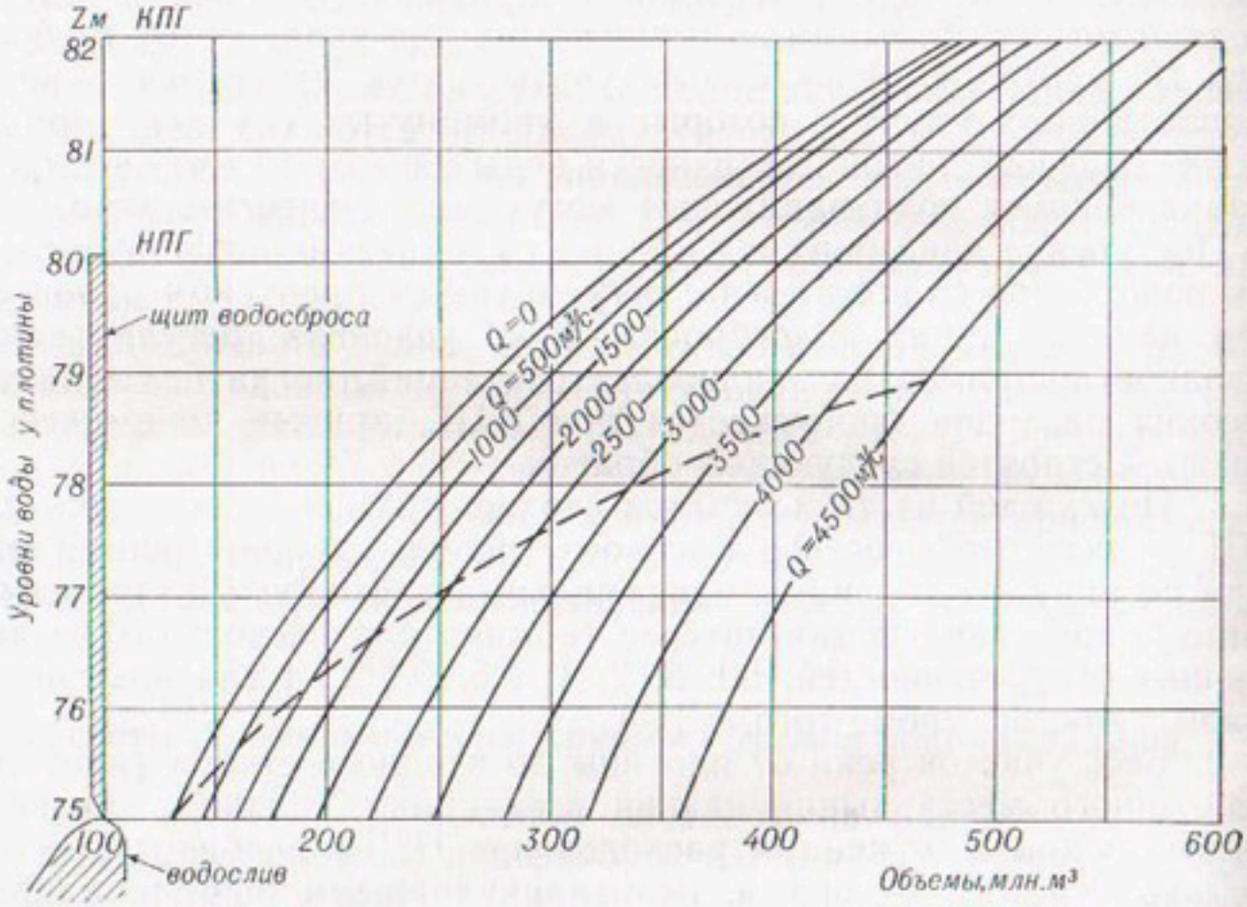


Рис. 116. Кривые динамических емкостей водохранилища.

нием приточного расхода над используемым. Паводки в таких случаях пропускаются автоматически, без искусственного регулирования.

Если на кривых (рис. 116) найти точки, соответствующие пропускной способности открытого водосброса по зависимости $Q=\varphi(Z)$, и соединить их, то получим кривую динамических объемов для нерегулируемого сброса воды (случай водосброса без затворов). Эта кривая показана на графике пунктиром.

Расчеты по статическим кривым объемов водохранилища

Наибольшее упрощение расчетов достигается при переходе к статическим емкостям водохранилища, которые соответствуют горизонтальным поверхностям воды. В этом случае объем воды в водохранилище при пропуске половодья или паводка считается

зависящим только от уровня воды у плотины и определяется по обычной, статической кривой объемов.

Для довольно частых и сравнительно малых расходов половодий и паводков и тем более для низкого стока межени водобалансовый расчет с определением наполнения или сработки водохранилища по статическим емкостям является достаточно точным.

При пропуске же высоких вод редкой повторяемости этот элементарный прием применим лишь к водохранилищам с подпором у плотины, значительно превышающим естественный подъем воды в реке при высоких половодьях или паводках.

Вообще этот прием допустим в тех случаях, когда статическая емкость в пределах трансформирующего объема мало отличается от динамической емкости, ограниченной снизу начальным стати-

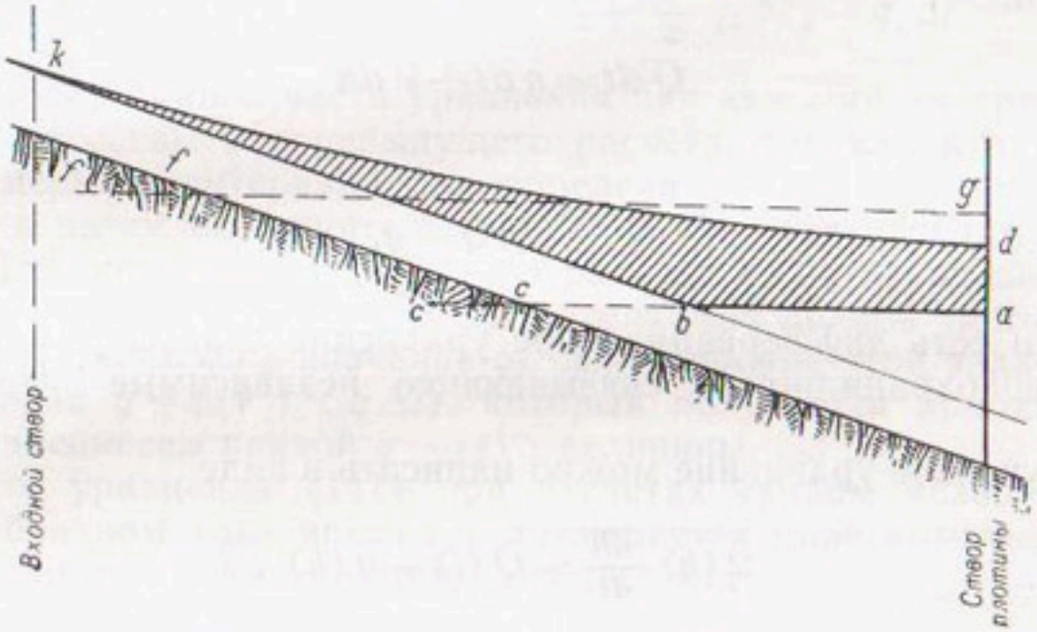


Рис. 117. Схема к расчету трансформации высокого стока по статическим емкостям водохранилища.

ческим уровнем водохранилища и естественным положением поверхности высоких вод в реке *abk*, а сверху кривой подпора при форсировке *dk* (рис. 117). Такие случаи возможны при высоких плотинах, а также при озеровидных водоемах. Для водохранилищ речного типа этот прием не годится ввиду значительного отклонения кривых подпора от статических уровней. Особенно это заметно при сравнительно низких плотинах, когда фиктивные статические объемы совершенно не соответствуют по конфигурации фактическим динамическим объемам (рис. 117).

В расчете по статическим кривым объемов водохранилища фактическое размещение водных масс *abkd* не учитывается, и вся емкость форсировки выше исходного статического уровня, ограниченная сверху кривой подпора, принимается за статическую емкость *acfg* и добавляется к сходной статической емкости. Этим самым на каждый момент уровень у плотины расчетом завышается, в связи с чем сбросные расходы также завышаются и срезка пика оказывается преувеличенной. В подобных условиях необходим

переход к рассмотренным выше приемам хотя бы с приближенным учетом роли динамики потока в изменении емкости водохранилища для одного варианта расчетов.

Полученный корректив относится затем ко всем остальным вариантам, выполняемым по упрощенному методу.

Применительно к статическим емкостям расчет трансформации половодья — выявление хода сбросных расходов во времени — начнем с аналитического выражения процесса трансформации.

Пусть в некоторый момент t напор над гребнем водослива (или над центром открытого донного отверстия) составляет h, приток в водохранилище Q, сбросной расход q, площадь зеркала Ω. За время dt уровень воды повысился на dh и в водоеме накопился объем Ωdh. При этом уравнение баланса воды за то же время имеет вид

$$Q\,dt = q\,dt + \Omega\,dh$$

или

$$\Omega \frac{dh}{dt} = Q - q.$$

Это и есть дифференциальное уравнение трансформации половодья водохранилищем, связывающее независимые переменные h и t.

Полученное уравнение можно написать в виде

$$\Omega(h) \frac{dh}{dt} = Q(t) - q(h),$$

где Ω, Q и q — известные функции: $\Omega(h)$ — кривая площадей зеркала; $Q(t)$ — гидрограф притока; $q(h)$ — кривая расходов водослива или донного отверстия.

Проинтегрировав это уравнение, получим зависимость $h = \varphi(t)$, т. е. хронологический график уровня воды (напора на водосливе). Пользуясь этим решением и формулой (142), находим $q = \varphi(t)$ — искомый хронологический график сбросных расходов.

Упомянутое дифференциальное уравнение решается упрощенно. Для этого напишем уравнения:

для притекающего объема

$$Q_{ср}\,\Delta t = \frac{Q_1 + Q_2}{2}\,\Delta t;$$

для вытекающего объема

$$q_{ср}\,\Delta t = \frac{q_1 + q_2}{2}\,\Delta t,$$

где Q_1 и q_1 — приточный и сбросной расходы в начале интервала Δt; Q_2 и q_2 — то же в конце его.

Уравнение водного баланса для водохранилища (уравнение неразрывности) примет вид

$$\frac{Q_1+Q_2}{2}\Delta t=\frac{q_1+q_2}{2}\Delta t+(V_2-V_1).$$

Здесь V_2-V_1 — разность объемов в конце и в начале интервала, т. е. приращение объема водохранилища за интервал Δt с.

Перепишем это уравнение в следующем виде:

$$V_2-V_1=Q_{ср}\Delta t-\frac{1}{2}q_1\Delta t-\frac{1}{2}q_2\Delta t,$$

или

$$V_2+\frac{1}{2}q_2\Delta t=Q_{ср}\Delta t+\left(V_1+\frac{1}{2}q_1\Delta t\right)-q_1\Delta t. \qquad (141)$$

Все члены правой части уравнения для каждого интервала времени Δt известны из предыдущего расчета, так как в начальный момент первого интервала они определяются по исходным параметрам, а затем от одного интервала к другому передаются расчетом. Для определения сбросного расхода q_2 на конец интервала Δt нужно по сумме $V_2+{}^1/_2q_2\Delta t$, определяемой правой частью уравнения (141), отыскать значение q_2. Для решения этой задачи строится график $q=\varphi(V+{}^1/_2q\,\Delta t)$, который получается прибавлением ко всем абсциссам кривой $q=\varphi(V)$ величины ${}^1/_2q\,\Delta t$.

Вместо уравнения (141) при расчетах «ходом назад» (в порядке, обратном ходу времени) применяется иное выражение, которое выводится таким же путем и имеет вид

$$V_1-\frac{1}{2}q_1\Delta t=V_2-\frac{1}{2}q_2\Delta t+q_2\Delta t-Q_{ср}\Delta t. \qquad (141')$$

При этом функция для вспомогательного графика будет следующая:

$$q=\varphi\left(V-\frac{1}{2}q\,\Delta t\right).$$

Такова графоаналитическая трактовка расчета трансформации по статическим емкостям, предложенная М. В. Потаповым, в интерпретации Я. Д. Гильденблата [91]. Рациональность ее в том, что она применима к любой конструкции водосброса (донные отверстия, водосливы открытые или со щитами и т. п.) и исключает необходимость подбора решений при расчете. Известны также приемы аналогичных расчетов Н. А. Ржаницына, Н. В. Мастицкого и др.

Пример. Входной гидрограф половодья изображен на рис. 118, кривые объемов и сбросных расходов — на рис. 119. При выбранном НПГ = 38,25 м для водослива без щитов дана одна кривая полной пропускной способности; для водослива со щитами пропускная способность $q^{(1)}$ показана при нескольких отметках порога, т. е. при разной высоте щитов ($h=2\div5$ м) от порога до

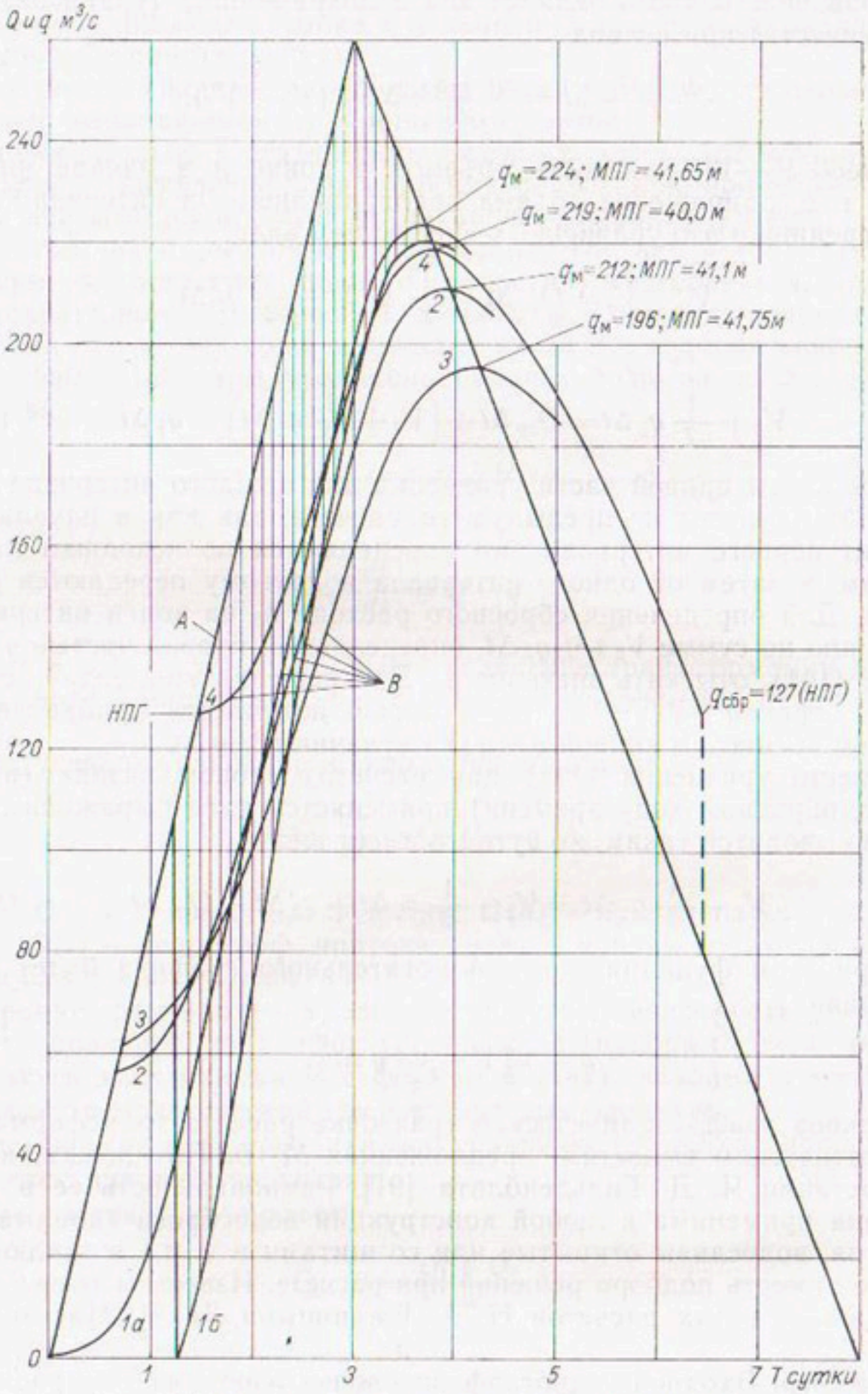


Рис. 118. Приточный и сбросные гидрографы половодья.

A — гидрограф притока *Q*; *B* — гидрографы сбросных расходов *q*: *1а*, *1б* — при водосливе без щитов, варианты без сработки (*1а*) и с предварительной сработкой призмы 5,84 млн. м³ (*1б*); *2* — при водосливе со щитами h=2 м, b_c=10 м; *3* — то же при h=3 м, b_c=6 м; *4* — то же при h=4 м, b_c=8 м.

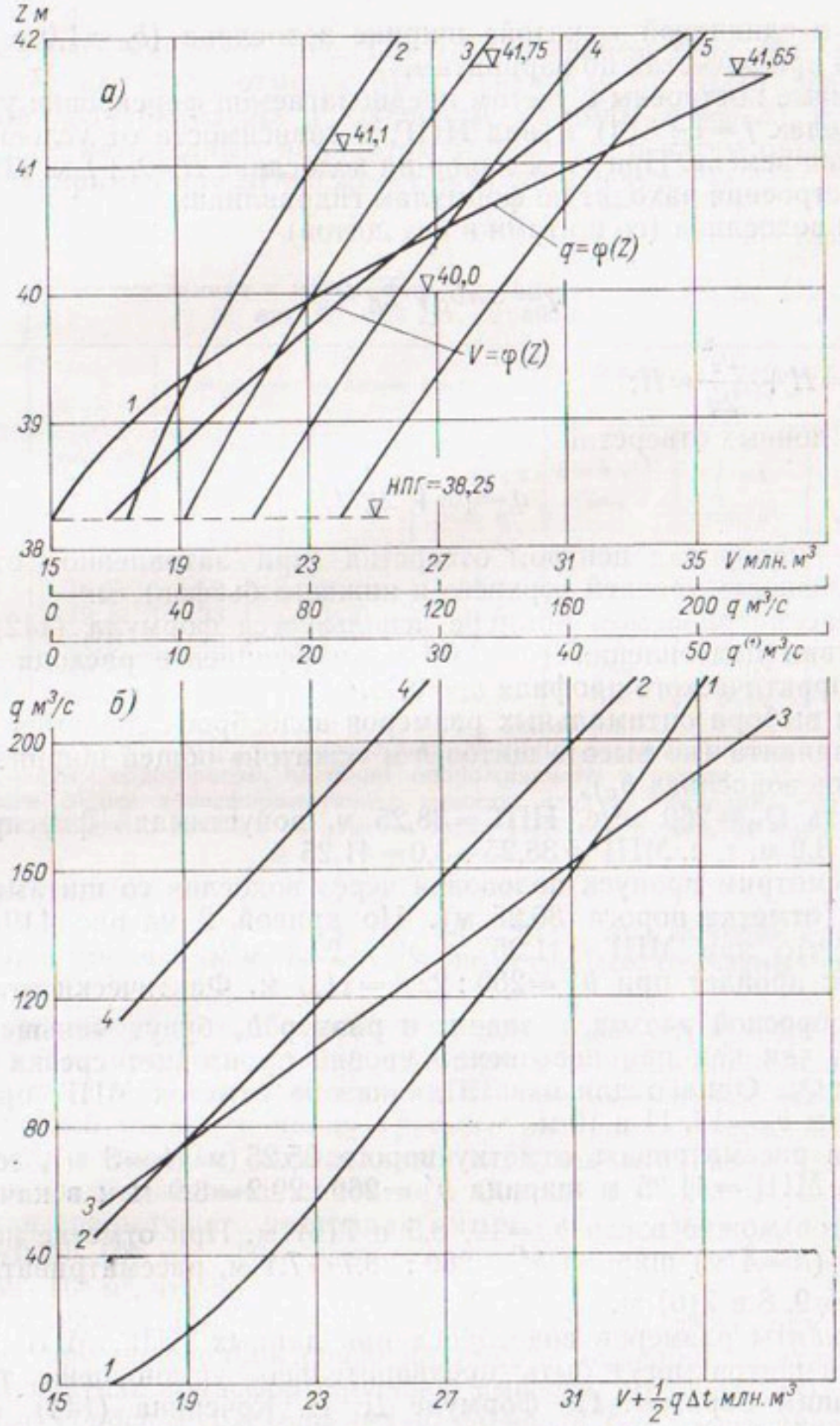


Рис. 119. Емкостные и гидравлические характеристики водохранилища.

а — кривые объемов водохранилища $V=\varphi(Z)$ и сбросных расходов: *1* — для водослива шириной $b=18$ м без щитов — $q=\varphi(Z)$; *2, 3, 4, 5* — то же на единицу «сжатой» ширины водослива со щитами ($b_c=1{,}0$ м) при высоте щитов $h=2, 3, 4, 5$ м — $q^{(1)}=\varphi(Z)$; *б* — расчетный график $q=\varphi(V+{}^1/_2 q\,\Delta t)$, при $\Delta t=21\,600$ с: *1* — для водослива без щитов; *2* — для водослива со щитами $h=2$ м, $b_c=10$ м; *3* — то же при $h=3$ м, $b_c=6$ м; *4* — то же при $h=4$ м, $b_c=8$ м

НПГ) и единичной «сжатой» ширине водослива ($b_c = 1{,}0$ м), что удобно при расчетах по вариантам.

Кривые построены с учетом предполагаемой форсировки уровня в пределах $f = 1 \div 3(4)$ м над НПГ, в зависимости от условий затопления земель. При этом напор на водосливе $H = h + f$ м. Данные для построения находят по формулам гидравлики:

для водослива (со щитами и без щитов)

$$q = \sigma m b_c \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \qquad (142)$$

где $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g} \approx H$;

для донных отверстий

$$q = \mu\omega \sqrt{2gH}, \qquad (142')$$

где H — напор над центром отверстия (при затопленном отверстии — разность уровней верхнего и нижнего бьефов), м.

В рассматриваемом примере используется формула (142) при отсутствии подтопления ($\sigma = 1{,}0$) и коэффициенте расхода водослива практического профиля $m = 0{,}45$.

Для выбора оптимальных размеров водосброса сопоставим 3—4 их варианта (по высоте щитов h и «сжатой» общей ширине всех пролетов водослива b_c).

Пусть $Q_м = 260$ м³/с, НПГ = 38,25 м, допустимая форсировка уровня 3,0 м, т. е. МПГ = 38,25 + 3,0 = 41,25 м.

Рассмотрим пропуск половодья через водослив со щитами $h = 2$ м (отметка порога 36,25 м). По кривой *2* на рис. 119*а* находим, что при МПГ = 41,25 м $q^{(1)} = 22{,}4$ м³/с, причем расход 260 м³/с пройдет при $b'_c = 260 : 22{,}4 = 11{,}6$ м. Фактически отметка МПГ, сбросной расход, а значит и размер b_c будут меньше указанных, так как при повышении уровня произойдет срезка пика до $q_м < Q_м$. Однако для охвата диапазона отметок МПГ примем варианты $b_c = 12$, 11 и 10 м.

Если рассматривать отметку порога 35,25 м ($h = 3$ м), то при том же МПГ = 41,25 м ширина $b'_c = 260 : 29{,}2 = 8{,}9$ м и в качестве вариантов можно взять $b_c = 10$, 8,5 и 7(6) м. При отметке порога 34,25 м ($h = 4$ м) ширина $b'_c = 260 : 36{,}7 = 7{,}1$ м, рассматривать можно $b_c = 9$, 8 и 7(6) м.

Варианты размеров водосброса при данных НПГ, МПГ и отсутствии щитов могут быть предварительно установлены также следующим образом. По формуле Д. И. Кочерина (144) определяют сбросной расход $q_м$, по которому затем, пользуясь зависимостью (142), находят b_c. При наличии щитов можно использовать формулу (151) или графики И. А. Железняка.

По выбранным вариантам размеров b_c должен быть выполнен уточненный расчет трансформации половодья по графоаналитическому методу или путем подбора.

Пользуясь кривыми (рис. 119 *а*), составляем табл. 95, записывая в нее для ряда отметок МПГ (начиная от НПГ) величины объемов водохранилища V, сбросные расходы $q=\varphi(Z)$ и $q^{(1)}=\varphi(Z)$ по намеченным вариантам водослива, а затем определяем $^1/_2 q\,\Delta t$, например при $\Delta t=0{,}25$ сут. $=21\,600$ с и т. д.

Таблица 95

Расчетные данные к построению зависимости $q=\varphi(V+^1/_2 q\ \Delta t)$ при $\Delta t=0{,}25$ сут. $=21\,600$ с.

Z м	V млн. м³	Водослив без щитов, $b=18$ м			Водослив со щитами, $h=4$ м, $b_c=8$ м		
		q м³/с	$\frac{1}{2} q\,\Delta t$ млн. м³	$V+\frac{1}{2} q\,\Delta t$ млн. м³	$q=b_c q^{(1)}$ м³/с	$\frac{1}{2} q\,\Delta t$ млн. м³	$V+\frac{1}{2} q\,\Delta t$ млн. м³
38,25	16,7	0	0	16,7	127	1,37	18,1
39,0	19,8	23,4	0,25	20,0	164	1,77	21,6
40,0	24,3	83,0	0,90	25,2	220	2,38	26,7
41,0	29,5	164	1,77	31,3	280	3,03	32,5
42,0	35,2	261	2,81	38,0	342	3,70	38,9

Примечание. При выявлении хода сбросных расходов из водохранилища с разборчатым водосбросом, частично опорожняемого в начале подъема воды или после сброса трансформирующей емкости, следует последние три графы табл. 95 заполнять, начиная от отметок ниже НПГ (например, от порога водослива).

По значениям q и $V+^1/_2 q\,\Delta t$ табл. 95 (в ней показаны данные лишь для двух вариантов водослива) строится расчетный график (рис. 119 *б*).

Расчет координат сбросных расходов приведен в табл. 96 для случаев без предварительной сработки водохранилища и со сработкой его на 5,84 млн. м³ ниже НПГ при водосливах без щитов.

Сбросной расход к концу третьего интервала (через 0,75 сут. от начала половодья) определяется следующим образом (для случая без предварительной сработки): $Q_{ср}\,\Delta t=1{,}17\cdot 10^6$ м³, а из расчета для предыдущего интервала имеем $V_1+0{,}5q_1\,\Delta t=17{,}61\cdot 10^6$ м³, $q_1\,\Delta t=0{,}09\cdot 10^6$ м³. При этом $V_2+0{,}5q_2\,\Delta t=1{,}17+17{,}61-0{,}09=18{,}69\cdot 10^6$ м³, что по рис. 114 дает $q_2=11{,}1$ м³/с.

Из данных табл. 96 и рис. 118 видно, что даже при значительной предполоводной сработке (35,6% величины заштрихованной на рисунке трансформирующей емкости, 16,4 млн. м³) максимальные сбросные расходы остаются почти без изменения: 224 и 221 м³/с. Это означает, что в ряде случаев предполоводная сработка водохранилища не дает практически ощутимого уменьшения сбросного максимума.

При наличии щитов отверстия открываются полностью лишь в тот момент, когда приток — ордината на подъеме гидрографа — как раз равен полной пропускной способности водосброса при

Таблица 96

Расчет трансформации половодья (по М. В. Потапову в интерпретации Я. Д. Гильденблата)

Время от начала половодья, сутки	Гидрограф притока			Гидрографы сброса					
				без предварительной сработки			с предварительной сработкой 5,84 млн. м³		
	Q м³/с	$Q_{ср}$ м³/с	$Q_{ср}\Delta t$ млн. м³	$V+\frac{1}{2}q\Delta t$ млн. м³	q м³/с	$q\Delta t$ млн. м³	$V+\frac{1}{2}q\Delta t$ млн. м³	q м³/с	$q\Delta t$ млн. м³
0	0			16,7	0	0			
		10,83	0,23						
0,25	21,67			16,93	1,0	0,02			
		32,50	0,70						
0,50	43,33			17,61	4,1	0,09			
		54,16	1,17						
0,75	65,00			18,69	11,1	0,24			
		75,83	1,64						
1,00	86,67			20,09	23,3	0,50			
		97,50	2,10						
1,25	108,33			21,69	39,8	0,86	0	0	0
		119,16	2,58						
1,50	130,00			23,41	60,0	1,30	2,58	16,0	0,35
		140,83	3,04						
1,75	151,67			25,62	87,8	1,89	5,27	43,0	0,93
. .	. . .	. . .	. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .
3,50	234,00			35,45	223,0	4,81	18,41	218,0	4,71
		227,50	4,91						
3,75	221,00			35,55	224,3	4,85	18,61	221,0	4,77
		214,50	4,64						
4,00	208,00			35,34	221,2	4,78	18,48	219,0	4,73
		201,50	4,35						
4,25	195,00			34,91	215,1	4,65	18,10	213,1	4,61
		188,50	4,07						
4,50	182,00								

НПГ (q). Значение этой ординаты Q, как и других, расположенных вправо от нее через принятые интервалы Δt, выписываем в табл. 97, определяем $Q_{ср}$, $Q_{ср}\Delta t$ и сброс для того же начального момента $q=Q$, за интервал $q\Delta t$, а также величину $V+{}^1/_2 q\Delta t$ (по начальному расходу $q_{НПГ}$ и графику на рис. 119 *б*). Если пик гидрографа $Q_м$ приходится на середину интервала Δt, то при существенной разнице (по сравнению с емкостью форсировки) между фактическим объемом притока за этот интервал и учитываемым ($Q_{ср}\Delta t$) конечную ординату этого интервала следует увеличить так, чтобы фактический объем притока за два интервала (вместе со следующим) не нарушался.

По табл. 97 для начала первого интервала имеем $q=127$ м³/с, причем $q\Delta t=2{,}74$ млн. м³ и $V+{}^1/_2 q\Delta t=18{,}1$ млн. м³ (по кривой *4*

Таблица 97

Расчет трансформации половодья при наличии водослива со щитами $h=4$ м, $b_c=8$ м, $\Delta t=0{,}25$ сут.$=21\,600$ с.

t сутки	Гидрограф притока			Гидрограф сброса		
	Q м³/с	$Q_{ср}$ м³/с	$Q_{ср}\,\Delta t$ млн. м³	$V+\frac{1}{2}q\,\Delta t$ млн. м³	q м³/с	$q\,\Delta t$ млн. м³
0	127			18,1	127	2,74
		138,5	2,99			
0,25	150			18,35	129	2,79
		161,5	3,49			
0,50	173			19,05	136	2,94
		184	3,97			
0,75	195			20,08	148	3,20
		206	4,45			
1,00	217			21,33	162	3,50
		228	4,93			
1,25	239			22,76	178	3,84
		249,5	5,39			
1,50	260			24,31	195	4,21
		253,5	5,48			
1,75	247			25,58	209	4,51
		240,5	5,20			
2,00	234			26,27	216	4,66
		227,5	4,92			
2,25	221			26,53	219	4,73
		214,5	4,63			
2,50	208			26,43	218	4,71
		201,5	4,35			
2,75	195			26,07	213	4,60
. .	. .	. .	. .	. .	. .	. .
4,50	104			20,09	148	3,20
		97,5	2,11			
4,75	91			19,0	136	2,94
		84,5	1,82			
5,00 .	78			17,88	125	

Примечание. t — время от начала повышения уровня над НПГ при открытых щитах.

на рис. 119 *б*). Для начала второго интервала получим $V+{}^1/_2q\,\Delta t=18{,}1-2{,}74+2{,}99=18{,}35$ млн. м³, чему по той же кривой соответствует $q=129$ м³/с, причем $q\Delta t=2{,}79$ млн. м³, для начала третьего интервала находим $18{,}35-2{,}79+3{,}49=19{,}05$ и т. д.

Максимальный сбросной расход по табл. 97 равен $q_м=219$ м³/с. При $b_c=8$ м $q_м^{(1)}=219:8=27{,}4$ м³/с и по кривой *4* (рис. 119, *а*) МПГ$=40{,}0$ м, т. е. $f=$МПГ$-$НПГ$=40{,}0-38{,}25=1{,}75$ м.

Для каждого из выбранных вариантов находится полная (строительная) ширина водослива по формуле

$$B = b_c + 0{,}1n\zeta H_0,$$

где $H_0 \approx H$ — напор над порогом водослива; n — число «сжатий», равное удвоенному числу пролетов; ζ — коэффициент «сжатия»: 1,0 — для прямоугольных в плане бычков, 0,7 — для бычков с полукруглым очертанием у входа потока, 0,4 — для стрельчатого входа. Например, при $h=4$ м, $f=1{,}75$ м, $b_c=8$ м, $H=4+1{,}75=5{,}75$ м и $\zeta=1{,}0$ при двух пролетах ($n=4$) находим $B=8+0{,}1\times 4\cdot 1{,}0\cdot 5{,}75=10{,}3$ м. Ширина в свету одного пролета $b=5{,}15$ м. Толщина промежуточного бычка 2,0 м.

Имея по всем вариантам строительные размеры водосбросов, величины форсировки уровня водохранилища f при пропуске расчетного половодья и площади затоплений при этом, производим окончательный технико-экономический выбор варианта водосброса.

В данном примере принят водослив с двумя щитами с размерами каждого $h=4$ м, $b=5{,}15$ м, причем МПГ = 40 м.

На рис. 118 нанесено несколько гидрографов сбросных расходов, в том числе и для принятого варианта водосброса. Там же показано, что когда на спаде сбросного гидрографа расход снизится до $q_{\text{НПГ}}$, гидрограф обрывается вертикально до графика притока. В этот момент щиты прикрывают так, чтобы, сохраняя НПГ, пропускать затем лишь расходы притока на спаде половодья.

Аналогичные расчеты трансформации нередко выполняются без предварительных построений для решения уравнений, но с применением подбора (поскольку отметка водоема к концу интервала, а значит, и средние за интервал отметка и сбросной расход заранее неизвестны). Расчет путем подбора, так же как и рассмотренный графоаналитический метод, применим для всяких форм гидрографа высоких вод и для любых типов водосброса. Последовательность расчета видна из данных табл. 98, в которой показано, что на каждый интервал времени оставляется по две-три строки для уточнения приближений.

Д. И. Кочерин [54] предложил простейшие зависимости для непосредственного приближенного определения сбросного расхода (или уровня форсировки), без вспомогательных построений и без последовательных расчетов по интервалам на ветвях подъема и спада. Соотношения, предложенные Кочериным, применимы при следующих допущениях и условиях:

а) график притока высоких вод представляет собой треугольник (или трапецию);

б) криволинейный график зависимости расходов водосброса от горизонтов водохранилища заменяется прямой линией;

в) водохранилище к началу половодья предполагается заполненным до НПГ;

Трансформация половодья водохранилищем

Обеспеченность половодья $P=0{,}1\%$, число отверстий водосброса 4

Дни	Приток в водохранилище		Расход для ГЭС		Сброс через водослив		Суточное изменение объема, 10^6 м³	Объем в начале суток, 10^6 м³	Отметка в начале суток, м	Объем в конце суток, 10^6 м³	Отметка в конце суток, м	Средняя отметка, м
	м³/с	10^6 м³	м³/с	10^6 м³	м³/с	10^6 м³						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1090	94	185	16	880	76	+2	340	44,28	342	44,28	44,28
2	1180	102	185	16	880	76	+10	342	44,28	352	44,40	44,34
					890	77	+9			351	44,40	44,34
3	1290	111	185	16	900	78	+17	351	44,40	368	44,60	44,50
					930	80	+15			366	44,60	44,50
4	1410	122	185	16	960	83	+23	366	44,60	389	44,80	44,70
					980	84	+22			388	44,80	44,70
....	...	...	...	..	...	...	...	...	...	...	...	...
10	4570	395	185	16	2420	209	+170	1141	49,41	1311	50,19	49,80
					2550	220	+159			1300	50,14	49,78
11	4500	389	185	16	2670	230	+143	1300	50,14	1443	50,70	50,42
					2770	239	+134			1434	50,69	50,42
12	4350	376	185	16	2880	248	+112	1434	50,69	1546	51,16	50,92
					2960	256	+104			1538	51,14	50,91
..	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Примечание. Расчет продолжается до наступления спада на сбросном гидрографе. Числовые величины по отдельным графам получаются из расчета: гр. 8=гр. 3 — гр. 5 — гр. 7; гр. 11=гр. 9+гр. 8; цифры в графах 6, 7 и 8, а значит, и в гр. 11 уточняются последовательным приближением в связи с подбором отметки в конце интервала. Конечный объем одного интервала является начальным для следующего.

г) водосброс является открытым (без щитов) и пропускает расходы, изменяющиеся с самого начала половодья и постепенно нарастающие по мере повышения уровня.

Для указанных условий расчетная схема иллюстрируется рис. 120 (применительно к треугольному графику притока).

Нарастание расхода, сбрасываемого из водохранилища, заменяется на рисунке прямой линией *1—3*, а трансформирующий объем $V_т$, необходимый для уменьшения естественного максимального расхода $Q_м$ до величины сбросного максимума $q_м$, изображается треугольником *1—2—3*.

Обозначая через $\sum Q$ полный объем притока высоких вод, соответствующий всей площади треугольника *1—2—4*, найдем следующие соотношения между элементами естественного и трансформированного гидрографов:

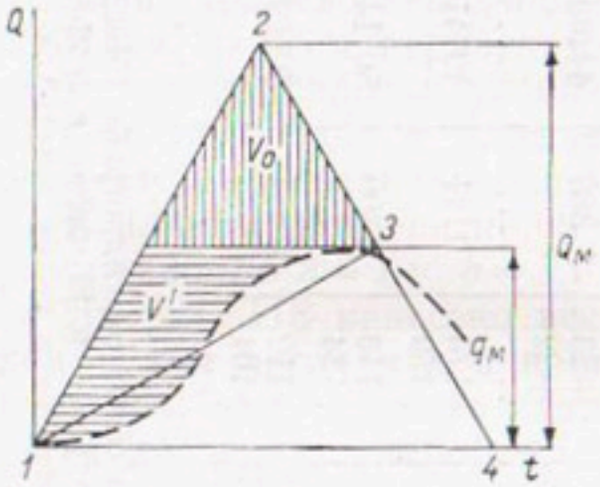


Рис. 120. Схема трансформации паводка на треугольном гидрографе и свободном водосливе.

1) трансформирующий объем (объем водохранилища над НПГ), необходимый для заданной срезки максимального расхода,

$$V_т = \sum Q \left(1 - \frac{q_м}{Q_м}\right). \qquad (143)$$

Это соотношение является очевидным из сопоставления треугольников *1—2—3* и *1—2—4*. Площадь треугольника *1—2—3* равна площади треугольника *1—2—4* минус площадь треугольника *1—3—4*, а последняя равна площади треугольника *1—2—4*, умноженной на отношение высот этих треугольников $q_м : Q_м$;

2) величина максимального сбросного расхода воды при заданной трансформирующей емкости водохранилища

$$q_м = Q_м \left(1 - \frac{V_т}{\sum Q}\right). \qquad (144)$$

Пусть, например, $Q_м = 260$ м³/с, $\sum Q = 89{,}5 \cdot 10^6$ м³ (рис. 118), МПГ = 41,25 м, НПГ = 38,25 м. По кривой объемов на рис. 119 *а* $V_т = 33{,}1 - 16{,}7 = 16{,}4 \cdot 10^6$ м³. При этом по формуле (144) $q_м = 260 \left(1 - \frac{16{,}4}{89{,}5}\right) = 212$ м³/с и по формуле (142) $b_с = \frac{q_м}{m\sqrt{2g}H^{3/2}} = \frac{212}{0{,}45 \cdot 4{,}43 \cdot 3^{3/2}} = 20{,}5$ м.

Для трапецеидального графика притока с учетом остальных вышеуказанных допущений и условий действительны следующие соотношения:

$$V_т = \sum Q - q_м \left(\frac{\sum Q}{Q_м} - \frac{t_2}{2}\right) \qquad (145)$$

и

$$q_м = \frac{\sum Q - V_т}{\frac{\sum Q}{Q_м} - \frac{t_2}{2}}, \qquad (146)$$

где t_2 — продолжительность стояния расхода $Q_м$.

Во всех формулах Д. И. Кочерина соотношение между продолжительностью подъема и спада на результат не влияет и в формулах не учитывается.

При устройстве водосбросов со щитами формулы Кочерина неприменимы и должны быть заменены иными соотношениями, которые также легко выявляются при указанных выше допущениях. Нарастающие расходы высоких вод пропускаются постепенно открывающимися щитами без превышения НПГ водохранилища к моменту полного открытия щитов. После этого начинается форсировка уровней и трансформация гидрографа.

Пусть в треугольном гидрографе притока (рис. 121) T — основание гидрографа, $\sum Q$ — суммарный приток за паводок, $\sum Q'$ — объем притока, проходящий выше уровня НПГ (сверх пропускной способности водослива q_0 при НПГ). При этом

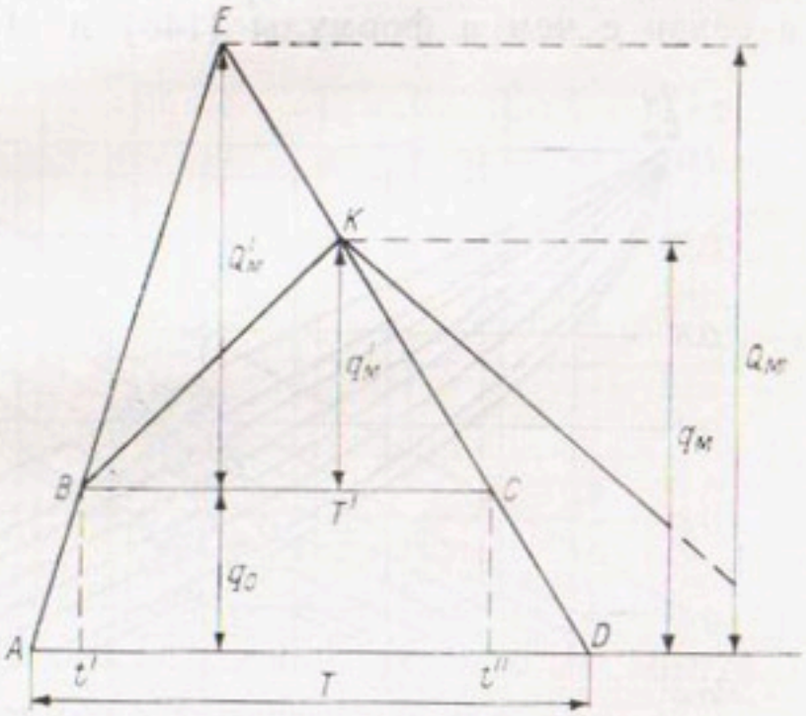


Рис. 121. Схема трансформации паводка при пропуске его через водослив со щитами (для треугольных гидрографов притока и сброса).

$$T = \frac{2\sum Q}{Q_м},$$

$$T' = \frac{T(Q_м - q_0)}{Q_м} = \frac{2\sum Q(Q_м - q_0)}{Q_м^2}, \qquad (147)$$

$$\sum Q' = \frac{T'(Q_м - q_0)}{2} = \frac{\sum Q(Q_м - q_0)^2}{Q_м^2}. \qquad (148)$$

Поскольку в трансформации участвует часть гидрографа выше пропускной способности водослива q_0 (рис. 121), то

$$q'_м = Q'_м\left(1 - \frac{V_т}{\sum Q'}\right). \qquad (149)$$

Заметим, что $Q'_м = Q_м - q_0$, а объем $\sum Q'$ определяется планиметрированием или по соотношению (148).

В результате

$$q_м = q'_м + q_0. \qquad (150)$$

Учитывая (150), (149) и (148), найдем весь максимальный сбросной расход

$$q_м = (Q_м - q_0)\left[1 - \frac{V_т}{\sum Q}\left(\frac{Q_м}{Q_м - q_0}\right)^2\right] + q_0. \qquad (151)$$

Решение производится подбором напора H на водосливе, при котором расход по уравнению (151) совпадает с расходом по зависимости (142) или (142′).

При трапецеидальном графике притока трансформация учитывается также для верхней части графика, над расходом q_0, в связи с чем в формулы (145) и (146), вместо величин $q_м$, $Q_м$

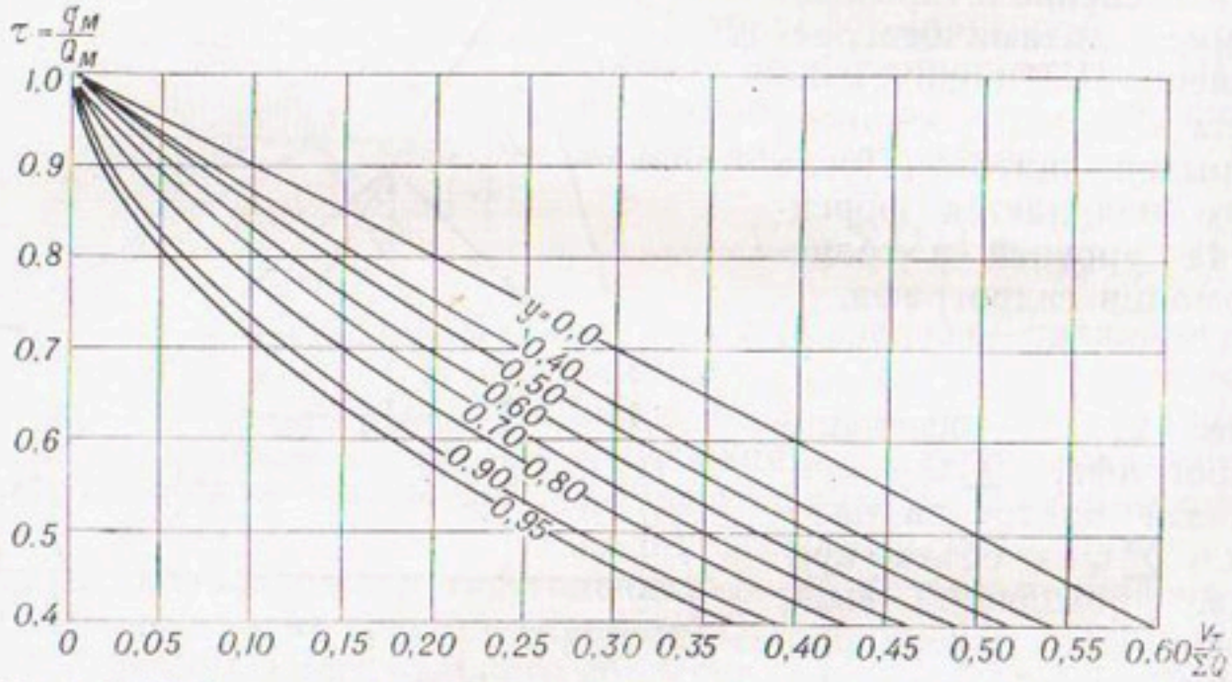


Рис. 122. График для определения коэффициента трансформации τ при треугольном гидрографе притока ($y = H_н : H_р$).

и $\sum Q$, следует вводить соответствующие $q'_м$, $Q'_м$ и $\sum Q'$. Понятно, что полный максимальный сбросной расход и в этом случае будет равен $q_м = q'_м + q_0$.

Упрощение решений достигается применением номограмм И. А. Железняка [23] (рис. 122 и 123) для водосливов со щитами. Сущность этих номограмм, основанных на тех же допущениях, что и выше приведенные формулы, состоит в следующем.

Поскольку расходы через водослив относятся между собой как соответствующие напоры в степени $^3/_2$, можно написать

$$x = \frac{q_0}{Q_м} = \left(\frac{H_н}{H_р}\right)^{3/2} = y^{3/2},$$

где $H_н$ — напор над порогом (гребнем) водослива при НПГ; $H_р$ — то же при расчетном (форсированном) горизонте; y — соотношение напоров.

Введем понятие о коэффициенте трансформации $\tau = q_м : Q_м$.

При отсутствии трансформации $q_м = Q_м$ и $\tau = 1$. В случае большой трансформирующей емкости $V_т$ по сравнению с $\sum Q$ сбросной максимум стремится к нулю; соответственно и коэффициент трансформации τ также стремится к нулю.

Очевидно, величина τ зависит не только от $V_т : \sum Q$, но и от x, так как при одних и тех же значениях $V_т$, $\sum Q$, $Q_м$, $H_п$ и при равных размерах водосброса возможны различные соотношения напоров $H_п : H_р$. Иначе говоря,

$$\tau = \varphi\left(\frac{V_т}{\sum Q},\ x\right).$$

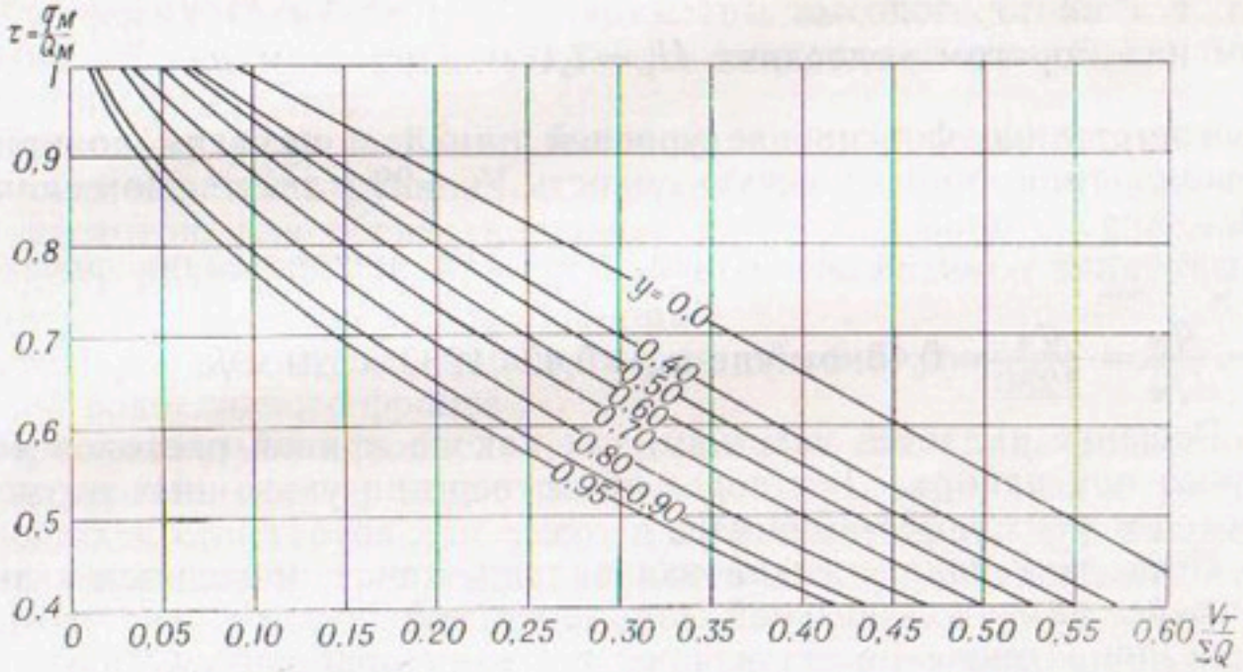


Рис. 123. График для определения коэффициента трансформации τ при трапецеидальном гидрографе притока с продолжительностью «стояния» максимума $t_2 = 0{,}1\ T$ $(y = H_п : H_р)$.

Для этой зависимости И. А. Железняк дает следующие выражения:

при треугольном графике притока

$$\tau = \frac{(1+x) - \sqrt{(1+x)^2 - 4x\left(1 - \frac{V_т}{\sum Q}\right)}}{2x}, \qquad (152)$$

при трапецеидальном графике притока

$$\tau = \frac{T(1+x) - \sqrt{T^2(1+x)^2 - 4x(T-t_2)d}}{2x(T-t_2)}, \qquad (152')$$

где T — общая продолжительность паводка; t_2 — продолжительность максимума; $d = \dfrac{\sum Q - V_т}{aQ_м}$; a — половина расчетной

единицы времени в секундах (если T и t_2 определены в сутках, $a=43\,200$, если в часах, $a=1800$).

Таким образом, коэффициенты трансформации могут быть определены по формулам (152) и (152′) или же непосредственно по графикам (рис. 122, 123), которые Железняк построил применительно к более удобной зависимости

$$\tau=\varphi\left(\frac{V_т}{\sum Q},\ y\right).$$

Пример. Пусть $Q_м=1230$ м³/с; $\sum Q=52$ млн. м³; гидрограф притока треугольный; число отверстий водосброса 2 размером 5×10 м каждое; $H_и=5$ м.

Решение. Задаемся расчетным (трансформированным) напором над порогом водослива $H_р=7{,}1$ м. При этом $y=\frac{5{,}0}{7{,}1}=0{,}713$. Соответственно форсировке уровней на 2,1 м находим по кривой объемов трансформирующую емкость $V_т=22$ млн. м³. По величине $\frac{V_т}{\sum Q}=\frac{22}{52}=0{,}423$ и значению $y=0{,}713$ находим по рис. 122 $\tau=\frac{q_м}{Q_м}=\frac{q_м}{1230}=0{,}43$, откуда $q_м=0{,}43\cdot 1230=529$ м³/с.

Решение является искомым, так как по кривой расходов водосброса при напоре 7,1 м через оба отверстия указанных размеров проходит расход $535\approx 529$ м³/с.

Поскольку такая постановка задачи, как в приведенном выше примере, является обычной для проектной практики, то графики Железняка также не исключают решения подбором. Однако расчеты по этим графикам сводятся к простым операциям. Необходимо иметь в виду, что формулы Железняка основаны лишь на учете влияния напоров на изменение сбросных расходов. Но на расход, а значит и на величину τ влияет также коэффициент подтопления, если оно наблюдается. Этот коэффициент изменяется с изменением напора, чего графики Железняка не учитывают.

Следует отметить, что формулы и графики, рассмотренные для водосливов со щитами, неприменимы при водосбросах в виде донных отверстий — труб. В последнем случае трансформация по статическим емкостям выполняется графоаналитическим методом или путем подбора.

§ 46. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОВОДИЙ И ПАВОДКОВ. БОРЬБА С НАВОДНЕНИЯМИ

Определение размеров водосброса и связанной с ними высоты плотины и площади затоплений производится после выбора НПГ и применительно к следующим исходным предпосылкам.

1. Если отметка МПГ (или КПГ), а значит и емкость водохранилища над НПГ (трансформирующая емкость) заданы, например по отметкам мостов или других сооружений в верхнем бьефе или пределами допустимого затопления земель, то размеры водосброса принимаются такими, чтобы наполнение водохранилища не превышало допустимого. Габариты водосброса находятся путем подбора варианта, удовлетворяющего заданному условию.

2. Если трансформирующая емкость водохранилища не задана, то ее требуется найти, для чего рассматривается несколько вариантов водосбросов, при которых определяется форсировка уровней над НПГ, высота плотины, площади затоплений и т. п. При этом технико-экономическая сущность задачи сводится к нахождению таких размеров водосброса, чтобы при прочих заданных условиях (отметка НПГ, параметры высокого стока и т. п.) достигался минимум суммы затрат на сооружение водосброса, плотины и на затопления.

Поскольку регулирование высокого стока в большинстве случаев совмещается с функциями водохранилища по повышению малых расходов, для обеих указанных выше исходных предпосылок к выбору размеров водосброса требуется соблюдение величины и гарантийности отдачи водохранилища.

Размеры водосброса определяются обычно уровнем порога и длиной водосливного фронта.

Применительно к водосливам со щитами как длина водослива, так и уровень порога задаются в нескольких вариантах с учетом имеющихся стандартов для высот и ширин затворов. Для каждого из этих вариантов строится зависимость между уровнем воды в водохранилище и расходом ее на водосливе (кривая расходов водосброса). Имея эти зависимости и кривую объемов водохранилища, производим расчет трансформации гидрографа высокого стока по каждому варианту водосброса.

Если высокий сток наступает при НПГ (ливневый паводок), расчет по каждому варианту сводится к определению максимального сбросного расхода и отметки МПГ или КПГ (уровня форсировки). Эти данные являются исходными для сравнения затрат по водосбросу, плотине и затоплениям.

При малой отдаче водохранилища и водопотреблении из верхнего бьефа желательно назначать меньшие размеры водосброса со щитами с меньшей их высотой во избежание значительных потерь в уплотнениях (см. § 8).

Если при варианте водосброса со щитами определяющими для сооружений являются весенние половодные максимумы, часть полезной емкости водохранилища (ниже НПГ) также должна быть использована для уменьшения стоимости сооружений или ущерба от затоплений. Эта часть емкости в средние и тем более в маловодные годы связана с неизбежной сработкой водохранилища к началу весны и, таким образом, участвует в регулировании высокого и низкого стока. В таком случае правила управления водохранилищем представляются в форме диспетчерского графика,

несколько более сложного, чем рассмотренный ранее (см. главу VII).

На диспетчерском графике, кроме противоперебойной и противосбросовой линий, наносится также *противоаварийная линия*, выше которой обязательна работа всех водосбросных и водопропускных отверстий гидроузла с полным их открытием во избежание переполнения водоема, которое может вызвать аварию.

Построение противоаварийной линии производится по расчетному гидрографу высокого стока. Вообще же вычисление координат противоаварийной линии желательно выполнять по гидрографам, построенным по моделям нескольких реальных половодий (или паводков), так как ход наполнений зависит от распределения стока за время половодья. При этом за противоаварийную принимается нижняя огибающая наполнений.

Расчеты к построению аналогичны рассмотренным в главе VII. За начало берется момент на спаде естественного гидрографа, когда приточный расход равен пропускной способности всех водосбросных и водопропускных отверстий при заданной расчетной форсировке уровня над НПГ. От этого момента расчет ведется в направлении, обратном течению времени, и продолжается до момента в начале половодья, когда наполнение водоема обеспечивает полный пропуск приточных расходов через водосбросные отверстия. Полученные по этому расчету наполнения водохранилища привязываются к календарной или скользящей шкале времени. Календарная шкала принимается в тех случаях, когда формирование расчетного гидрографа связывается с дождями (дождевой или смешанный, снего-дождевой сток), которые могут неоднократно повторяться на протяжении определенного сезона высокого стока. При расчете регулирования половодий от талого стока применяется скользящая шкала времени, так как сезон половодья от снеготаяния хотя и является достаточно определенным, но в пределах этого сезона расчетное половодье не повторяется, а лишь перемещается.

Противоаварийная линия (ее ветвь опорожнения) распространяется и на окончание межени (конец зимы), предшествующей высокому половодью. При календарной шкале времени ветвь опорожнения смыкается с ветвью наполнения. При скользящей шкале ветвь опорожнения противоаварийной линии приурочивается к наиболее раннему началу половодья.

Поскольку ветвь опорожнения непродолжительна, расчет ведется по стоку начала половодья (до крутого подъема) и конца предшествующей межени. Для этого периода принимается наиболее многоводный приток. Однако расчетную обеспеченность стока конца межени не следует принимать с излишним запасом. Так, при проектировании весьма капитальных сооружений С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель [61] рекомендуют ориентироваться на вероятность превышения этого стока порядка 1%, так как сочетания исключительно многоводного конца межени с чрезвычайно высоким половодьем маловероятны. Ветвь опорожнения противоаварийной линии строится как нижняя огибающая линий опорожнения водохра-

нилища перед половодьем (при полностью открытых водосбросных отверстиях).

Водосбросное сооружение (и соответствующая ему трансформирующая емкость) должно быть таким, чтобы противоаварийная (*1—6*) и противоперебойная (*1—2*) линии (получаемые по расчету для ветвей наполнения) касались друг друга в точке *1* при раннем половодье (см. рис. 64). Если противоаварийная линия пересекает противоперебойную, то габариты водосброса преуменьшены, и эксплуатация водохранилища оказывается невозможной: пересечение упомянутых кривых в нижней части ветви наполнения означало бы, что при некотором наполнении в этой зоне должен быть холостой сброс, хотя в то же время для предотвращения перебоя требуется соблюдать только гарантированную отдачу.

Если же противоаварийная линия на всем протяжении ветви наполнения располагается выше противоперебойной, то габариты водосброса преувеличены, а та часть полезной емкости, которая освобождается к весне, для трансформации половодья недоиспользована. При этом имеется возможность или повысить коэффициент регулирования стока (т. е. повысить НПГ без изменения горизонта форсировки), или уменьшить форсировку и тем самым снизить затопление и стоимость подпорных сооружений, или уменьшить размеры водосброса с тем, чтобы использовать допустимую форсировку и освобождаемую к весне емкость.

Если форсировка над НПГ уровней водохранилища в расчетное половодье не предусматривается, построение противоаварийной и противоперебойной линий начинается от НПГ. Первая, согласно изложенному, строится по стоку высокого (расчетного) половодья при полном открытии водосбросных отверстий, вторая — по стоку низких половодий при удовлетворении только гарантированного водопотребления. Обе линии должны встретиться также в точке *1* (при раннем половодье), как показано на рис. 64. На этом же рисунке линия *1—2* — противоперебойная для раннего половодья, а линия *3—4* — для позднего. Противосбросовая линия *1—10* показана для ветви опорожнения; в зоне наполнения ветвь этой линии (см. пример в § 20) проходит ниже противоперебойной линии, и в таком случае эта ветвь неприемлема. Противоаварийная линия дана в двух вариантах: для раннего половодья *(7—1—9—6)* и для позднего (*7—1—3—8*). Верхние участки этой линии, над НПГ, наносятся лишь для построения линии, поскольку оно начинается от точек *6* и *8*; в эксплуатации же используются только ветви ниже НПГ, так как в зоне форсировки, выделенной специально для трансформации высокого стока, открытие всех водосбросных отверстий является обязательным.

Комплекс вопросов, разрешаемых при регулировании высокого стока как технико-экономическая и водохозяйственная задачи, впервые в литературе освещен Крицким и Менкелем [61].

Выбор размеров водосброса и построение противоаварийной линии иллюстрируются нижеследующим примером, увязанным с диспетчерским регулированием стока (см. § 21).

Гидрограф расчетного половодья с вероятностью ежегодного превышения $P=0{,}1\%$ (для II класса сооружений) имеет во входном створе среднесуточные расходы, приведенные в табл. 99. Координаты кривой объемов водохранилища, а также координаты кривых суммарного расхода водопропускных отверстий (турбин ГЭС и водослива) при полном их открытии даны в табл. 100.

Таблица 99

Ежедневные расходы расчетного гидрографа половодья, м³/с

Число	III	IV	V	Число	III	IV	V
1	—	410	365	17	—	1790	135
2	—	520	340	18	—	1550	122
3	—	976	324	19	—	1340	111
4	—	1440	310	20	—	1150	98
5	—	1850	296	21	40	1010	86
6	—	2280	280	22	49	866	77
7	—	2620	269	23	57	785	70
8	—	2930	255	24	70	708	65
9	—	3160	240	25	92	622	—
10	—	3310	232	26	115	540	—
11	—	3230	215	27	148	486	—
12	—	3150	208	28	175	441	—
13	—	2910	190	29	216	419	—
14	—	2690	174	30	259	395	—
15	—	2360	161	31	310	—	—
16	—	2070	150				

Таблица 100

Координаты номограммы $q=\varphi(V-{}^1/_2 q\Delta t)$

Условная отметка Z м	V, 10^6 м³	$b=55$ м			$b=52$ м			$b=49$ м		
		q м³/с	$\frac{q\Delta t}{2}$, 10^6 м³	$V-\frac{q\Delta t}{2}$, 10^6 м³	q м³/с	$\frac{q\Delta t}{2}$, 10^6 м³	$V-\frac{q\Delta t}{2}$, 10^6 м³	q м³/с	$\frac{q\Delta t}{2}$, 10^6 м³	$V-\frac{q\Delta t}{2}$, 10^6 м³
87,0	140	210	18	122	210	18	122	210	18	122
88,0	180	316	27	153	306	26	154	292	25	155
89,0	250	437	38	212	425	37	213	412	36	214
90,0	340	632	54	286	600	52	288	575	50	290
91,0	440	835	72	368	801	69	371	763	66	374
92,0	550	1070	92	458	1030	89	461	968	84	466
93,0	680	1328	115	565	1263	109	571	1195	103	577
94,0	820	1600	138	682	1515	131	689	1435	124	696
95,0	980	1883	163	817	1782	154	826	1678	145	835
96,0	1170	2180	188	982	2057	178	992	1935	167	1003
97,0	1380	2485	215	1165	2344	202	1178	2200	190	1190

За начало половодья принято 23/III, когда расход воды в реке достигает гарантированной отдачи (55,5 м³/с).

Необходимо выбрать такие размеры водосброса, чтобы регулирование высокого стока не отражалось на гарантийности водоот-

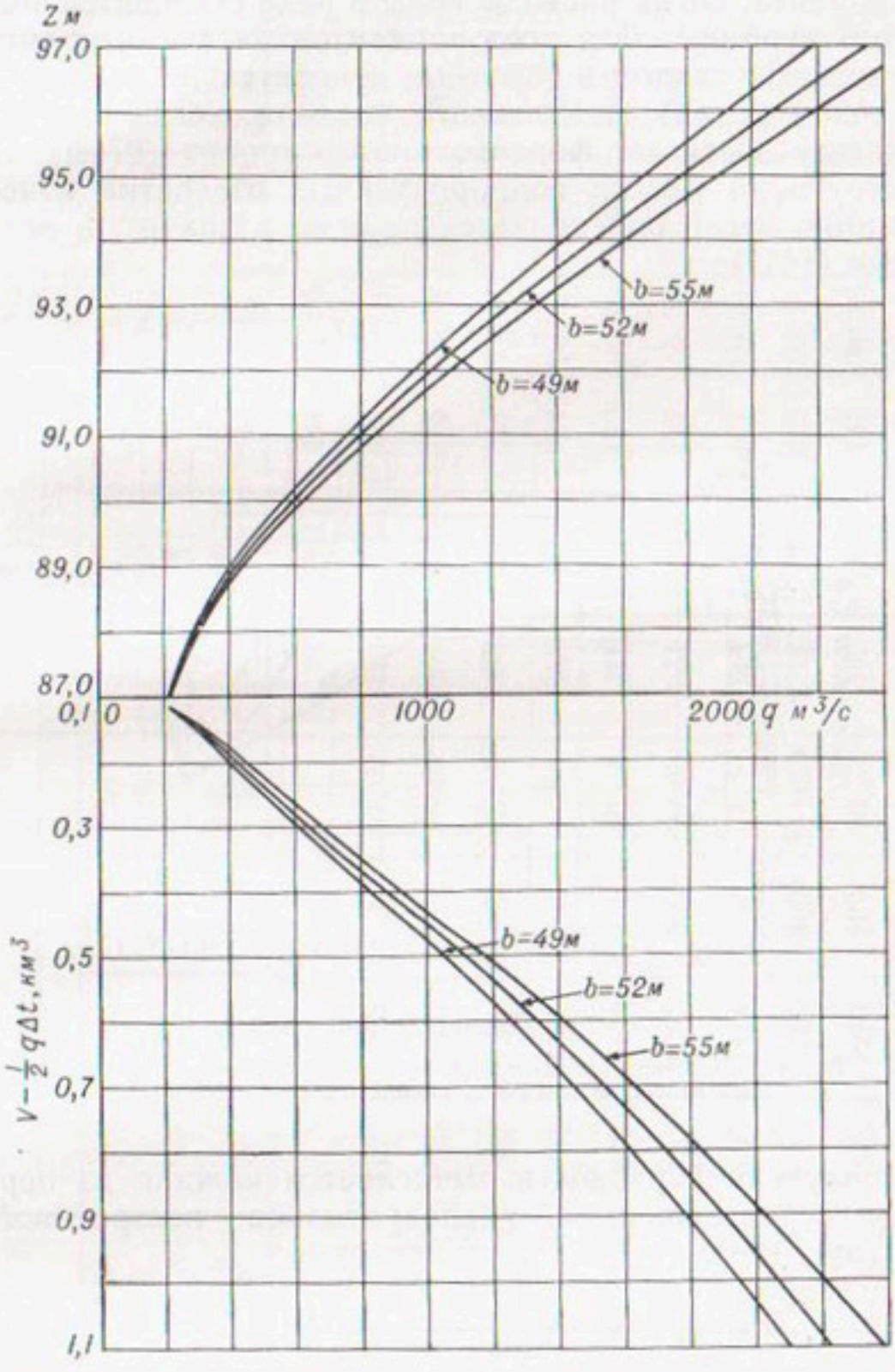


Рис. 124. Зависимость $q=\varphi(V-{}^1/_2 q\,\Delta t)$ и $q=\varphi(Z)$.

дачи и чтобы форсировка уровня при пропуске расчетного половодья не превышала 1,5 м.

Размеры водосброса определяются подбором, для чего рассматриваются три варианта длины отверстия водосброса (55, 52 и 49 м) при отметке порога на 8,5 м ниже НПГ = 95,5 м усл. В рас-

чете учитывается расход через турбины 210 м³/с. Суммарная пропускная способность плотины и ГЭС при отметке 97 м составляет соответственно 2485, 2344 и 2200 м³/с. Эти расходы на спаде наблюдаются на 18-й день от начала регулирования половодья, т. е. от момента, когда расходы воды в реке становятся больше расхода через турбины. Для всех вариантов расчет выполнен графоаналитическим методом в обратном относительно хода времени порядке (ходом назад) от конечного момента, когда наполнение водохранилища достигает форсированного уровня (97 м). При этом соответствующий расход водопропускных отверстий известен. По этим данным легко определяется правая, а значит, и левая часть уравнения (141′)

$$V_1 - \frac{1}{2} q_1 \Delta t.$$

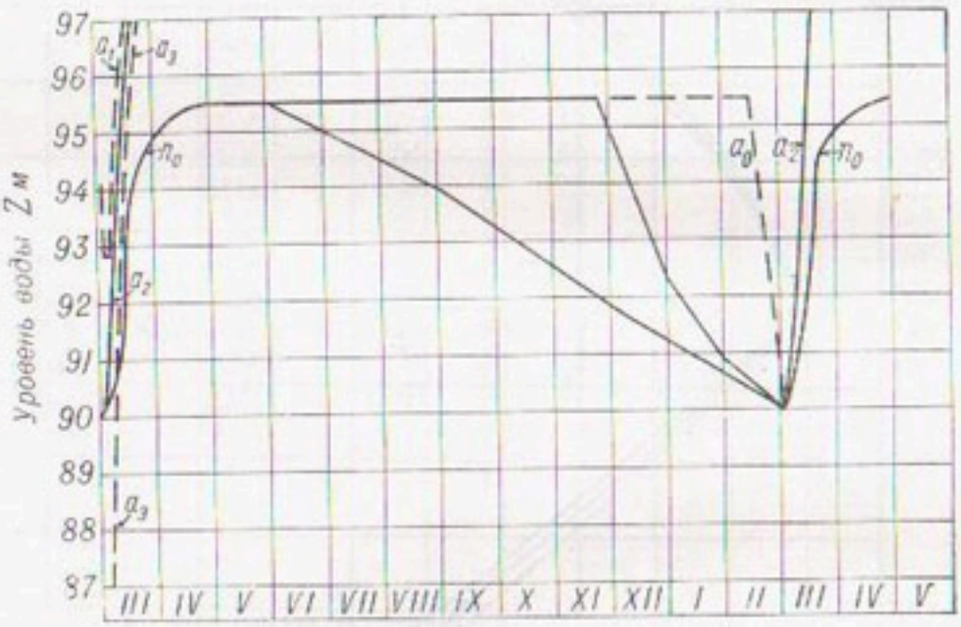


Рис. 125. Диспетчерский график.

Ветви наполнения противоперебойной и противоаварийной линий показаны для раннего начала половодья (1/III).

Для полученной разности вычисляется каждая из переменных V_1 и q_1 с использованием предварительно построенной номограммы (рис. 124).

$$q = \varphi\left(V - \frac{1}{2} q \Delta t\right),$$

координаты которой приведены в табл. 100 при $\Delta t = 2$ сут. $=$ $= 172\,800$ с.

По номограмме находятся величины q_1, по которым затем определяются V_1 [из тех же известных разностей $V - \frac{1}{2} q \Delta t$, равных правой части уравнения (141′)].

Результаты расчетов представлены на рис. 125 и в табл. 101.

Таблица 101

Расчет координат противоаварийной линии

День от начала регулирования	Приток			$b = 55$ м				$b = 52$ м				$b = 49$ м			
	Q м³/с	$Q_{ср}$ м³/с	$Q_{ср}\,\Delta t$, 10^6 м³	$V - \frac{q\,\Delta t}{2}$, 10^6 м³	q м³/с	$q\,\Delta t$, 10^6 м³	отметка Z м	$V - \frac{q\,\Delta t}{2}$, 10^6 м³	q м³/с	$q\,\Delta t$, 10^6 м³	отметка Z м	$V - \frac{q\,\Delta t}{2}$, 10^6 м³	q м³/с	$q\,\Delta t$, 10^6 м³	отметка Z м
19-й	2070							1178	2344	404	97,00	1190	2200	380	97,00
		2380	412												
17	2690			1165	2485	430	97,00	1170	2327	402	96,95	1158	2155	372	96,83
		2920	505												
15	3150			1090	2360	408	96,60	1067	2170	375	96,39	1025	1966	340	96,11
		3230	559												
13	3310			939	2100	363	95,75	883	1877	324	95,35	806	1626	281	94,80
		3120	539												
11	2930			763	1766	305	94,58	668	1472	254	93,82	548	1136	196	92,76
		2605	451												
9	2280			618	1454	251	93,48	471	1052	182	92,10	293	583	101	90,06
		1860	322												
7	1440			547	1280	222	92,83	331	705	122	90,53	72*	210	36	87,00
		980	169												
5	520			600	1414	244	93,34	284	587	101	89,95				
		415	72												
3	310			772	1785	309	94,65	313	665	115	90,32				
		263	45												
1	216			1036	2270	392	96,30	383	840	145	91,15				

* Вместо цифры 122, соответствующей мертвому объему. Это означает, что наполнение до ГМО будет не на 7-й день, а на 8-й.

Согласно расчетам, при длине водослива $b=55$ м ветвь наполнения a_1 на левой части рис. 125 проходит выше противоперебойной линии n_0 (последняя, как и противосбросовая линия сработки, показана на рис. 64). Значит такая длина водосброса превышает потребную. При длине водосброса $b=49$ м линия наполнения a_3 пересекает противоперебойную линию, т. е. длина водосброса недостаточна. При $b=52$ м линии a_2 и n_0 касаются своими нижними участками. Следовательно, линия a_2 принимается за ветвь наполнения противоаварийной линии, так как условия задачи при этом соблюдаются. Искомая длина водосброса $b=52$ м.

Ветвь опорожнения противоаварийной линии (a_0) построена по стоку многоводной межени вероятностью превышения 1% также ходом назад от точки, соответствующей ранней дате начала половодья.

Обеспеченный объем стока трех зимних месяцев (декабря, января, февраля) равен 1,35 км^3, к чему близок зимний сток 1902-03, 1919-20, 1947-48 гг. и других, гидрографы которых за указанные месяцы принимаются как модели. Зимний сток этих лет приведен к расчетной величине 1,35 км^3 умножением среднемесячных расходов на коэффициенты приводки аналогично указанному в § 20.

По полученным таким путем приведенным значениям стока выполнен расчет опорожнения водохранилища при полностью открытых водосбросных отверстиях ($b=52$ м). Расчет производился путем подбора с учетом притока и сброса.

Верхняя огибающая полученных линий принимается за ветвь опорожнения противоаварийной линии.

В последние годы появились работы, посвященные способам расчета водохранилищ, комплексно используемых для борьбы с наводнениями и для водохозяйственного регулирования стока. В этих работах установлено, что, используя для трансформации паводка часть рабочей емкости водохранилища, можно без ущерба для гарантийного режима водоэнергоотдачи установки существенно сократить общую емкость, т. е. уменьшить высоту водоподпорных сооружений и площадь затопления земель. Этот вопрос касается главным образом рек Дальнего Востока, отличающихся обильными наводнениями при муссонах в пределах всего лета. Комплексное использование водохранилища здесь возможно при эксплуатации его по диспетчерскому графику. Такой график строится для соблюдения гарантийного режима за весь паводочный период — с мая по октябрь.

Противоперебойная линия наполнения обеспечивает расчетный уровень водохранилища к началу сезона низкого стока и сброс лишних запасов к началу сезона паводков.

Таким образом, надежность работы сооружений в этом случае связывается со строгим соблюдением правил эксплуатации водохранилища по диспетчерскому графику, что может быть обеспечено внедрением безупречной автоматики и телемеханики.

Изложенная методика регулирования половодий и паводков для выбора размеров водосброса и эксплуатации сооружений составлена в увязке с водохозяйственным регулированием стока и ориентирована на работу водохранилища без прогноза стока.

Практика показывает, что выполняемое теперь для ГЭС регулирование стока по диспетчерским графикам без гидропрогнозов

позволяет даже при годовом регулировании использовать в среднем за год до 90—92% теоретически предельно возможного количества энергии при наличных параметрах водохранилища и ГЭС. Стопроцентная оправдываемость прогнозов стока при желательной их заблаговременности могла бы повысить процент использования гидроэнергии до 95—97.

Применительно к малым и средним рекам (со сроками добегания высоких вод лишь в несколько суток) эффективность учета прогноза стока половодий или паводков для увеличения использования стока при довольно значительных погрешностях прогноза во многих случаях является несущественной.

Использование данных прогноза требует учета удвоенных стандартных положительных ошибок, принимаемых как поправки к этим данным при опасении переполнения водоема, и отрицательных — при опасении излишней сработки.

Для эксплуатации водохозяйственной установки краткосрочные прогнозы, связанные с меньшей ошибкой, более надежны, но не могут дать достаточного эффекта по причине ограниченности размеров водопроводящих устройств и водопотребления. С увеличением заблаговременности прогноза условия использования водных ресурсов улучшаются, но при этом резко возрастает ошибка прогноза, заставляющая иногда без надобности переходить на гарантированный режим.

Ясно, что в тех случаях, когда для водохранилища затруднительна нормальная плановая работа (отсутствие данных к построению диспетчерского графика, работа водохранилища в пусковой период и т. п.), использование надежных гидропрогнозов с небольшой заблаговременностью может оказать существенную помощь водному хозяйству гидроузла.

Следует помнить, что гидропрогнозы обычно даются на основании главным образом данных опорных пунктов многолетних наблюдений, которые имеются в большинстве случаев для достаточно больших рек, для которых и сами прогнозы поэтому более надежны. Однако и здесь возможны существенные погрешности. Так, для Днепра у Днепрогэса весной 1953 г. при снежной зиме ожидалось по прогнозу половодье выше среднего, а фактически максимум в этом году (2563 м³/с) был почти самым низким за все многолетие (средний максимум здесь равен 7760 м³/с). Тогда же на малых реках Донбасса поверхностного весеннего стока, ожидавшегося по прогнозу также выше среднего, практически не было (весеннее повышение уровней в реках по сравнению с низкими зимними составило всего 20—30 см).

В результате многие водохранилища Донбасса, усиленно расходовавшие воду зимой, оказались сработанными до ГМО без существенного пополнения весной и в последующую межень.

Случаи неудачных прогнозов имелись и на Цимлянской ГЭС на Дону, что приводило как к большому бесполезному сбросу воды, например весной 1963 г. (при излишней экономии запасов в зимнее время), так и к затруднениям при ненаполнении водохранилища

в половодье из-за усиленной зимней сработки по прогнозу, например весной 1966 г. То же было и на Рыбинской ГЭС на Волге в 1955, 1960 гг. и др.

Таким образом, возможную роль прогнозов стока при проектировании водосбросов и в эксплуатации водохранилищ для ответственных потребителей следует каждый раз оценивать соответственно реальным условиям, соразмерно эффекту прогнозов и надежности их.

Применительно к сооружениям на малых реках использование прогнозов высокого стока является затруднительным как из-за кратковременности добегания, так и в связи с более значительными для малых рек возможными погрешностями прогноза. Более существенное значение в этих условиях могут иметь не столько гидропрогнозы, сколько гидроинформации, передаваемые по телефону, телеграфу и т. п. Этот вид оповещений, учитывающий по гидрометрическим и гидравлическим связям продвижение водных масс по длине реки, может оказать серьезную помощь в эксплуатации водосбросных сооружений на малых реках. Для больших рек заблаговременность такого рода информаций по времени добегания становится значительной. При этом время продвижения воды в пределах зоны информации достигает 10—15 дней и более. В результате удается не только облегчить эксплуатацию водосбросных сооружений, но и уменьшить их размеры при учете своевременной сработки водохранилища. Подобные случаи возможны, если водохранилище обладает значительной емкостью, а регулируемый гидрограф характерен острым пиком. В частности, такие условия имели место для Каховской ГЭС на Днепре, и их учет проектировщиками позволил существенно уменьшить длину водосливного фронта.

Изложение вопросов о прогнозах стока и гидроинформациях дается в работах [43, 59] и др.

Рассмотренная выше задача совмещенного регулирования высокого стока наряду с повышением низких расходов решается на основании технико-экономических показателей (стоимость водосброса с учетом других затрат и ущербов в верхнем бьефе), но независимо от величины сбросного максимума, поступающего в нижний бьеф.

Особое положение занимает задача регулирования высокого стока для уменьшения наводнений в нижнем бьефе. При этом величина максимального сбросного расхода $q_м$ является основным критерием для выбора решения (хотя этот критерий можно заменить стоимостными показателями, с учетом стоимости сооружения и эксплуатации ограждающих дамб в нижнем бьефе). В этом случае стоимость водосброса отодвигается на задний план и решающее значение приобретает стоимость создания водохранилища (с учетом связанных с ним затрат и ущербов) в зависимости от степени срезки максимального расхода. Такая задача в зависимости от условий к созданию емкости для борьбы с наводнениями может рассматриваться в двух вариантах:

1) известна емкость водохранилища; требуется определить максимальный сбросной расход воды в половодье или в паводок заданной обеспеченности;

2) задан допустимый для нижнего бьефа сбросной расход, который не должен превышаться; требуется найти емкость водохранилища для обеспечения этого условия.

Водохранилища, специально предназначенные для борьбы с наводнениями, строятся сравнительно редко; это назначение водохранилищ обычно стараются совместить с другими водохозяйственными целями. Один из примеров такого водохранилища с режимом, назначенным почти при отсутствии гидрометрического ряда наблюдений, описан в книге [77]. При этом нижняя часть емкости водохранилища, регулирующая сток для повышения малых расходов, и ее верхняя часть, временно заполняемая при пропуске паводка, эксплуатируются с соблюдением специфических требований к размерам упомянутых емкостей, режиму работы водохранилища и к конструкциям водосброса.

Наименьшая емкость водохранилища для борьбы с наводнениями при заданном сбросном максимуме и, наоборот, наименьший сбросной максимум при заданной емкости достигаются при условиях, если водосброс обеспечивает пропуск в нижний бьеф заданной величины сбросного расхода в течение всего периода времени с приточными расходами более заданного сбросного (см. рис. 120). До начала этого периода расходы притока пропускаются целиком. Аккумуляция избытков притока будет происходить лишь в упомянутый период. Наибольшего наполнения водохранилище достигнет в момент, когда уменьшающиеся расходы притока на спаде половодья станут равны заданному сбросному. После этого идет освобождение емкости v_0, отведенной для борьбы с наводнениями.

На рис. 120 видно, что если бы заданная срезка приточного максимума до величины $q_м$ достигалась водохранилищем с водосливом без затворов, то в водохранилище потребовалось бы удерживать объем не v_0, а v_0+v_1. Это объясняется низкой пропускной способностью водослива без щитов при опорожненном водохранилище, когда уровень воды мало возвышается над его порогом.

Если водопропускные отверстия снабжены затворами, позволяющими регулировать пропуск воды в нижний бьеф, то дополнительная емкость v_1 может быть устранена, так как сброс расходов в нижний бьеф в этом случае будет близок к варианту сброса, требующего лишь емкость v_0. Но при этом необходим водосброс больших размеров с весьма низким порогом отверстий, перекрываемых затворами. Такое условие возникает в связи с тем, что уже в начале наполнения емкости v_0 водосброс должен пропускать расход, равный заданному сбросному максимуму. Этому условию, как известно, в наилучшей степени удовлетворяют не водосливы с затворами, а донные отверстия (водоспуски), работающие под более значительными напорами, чем водосливы рассмотренных типов, и потому имеющие бóльшую пропускную способность при одной

и той же площади отверстий. Указанное свойство донных отверстий заставляет обращаться к ним не только в случае борьбы с наводнениями в нижнем бьефе, но и для уменьшения затоплений в пределах водохранилища независимо от условий разлива реки ниже плотины.

§ 47. ТРАНСФОРМАЦИЯ ВЫСОКИХ ВОД СИСТЕМОЙ ВОДОХРАНИЛИЩ НА МАЛЫХ РЕКАХ

Трансформация паводков системой водохранилищ пока еще мало изучена. В литературе известна расчетная схема В. Н. Цингера [131], основанная на построении изохрон по Д. Л. Соколовскому. Упомянутую схему обусловливают следующие расчетные данные и предпосылки: а) количество осадков и распределение их по площади; б) распределение осадков во времени; в) коэффициенты стока (по различным частям бассейна) и изменение их за время дождя (ливня); г) скорости добегания стока по склонам и по гидрографической сети; д) неопределенность обеспеченности ливня и расхода. Эта схема имеет важное значение для приближенного исследования пропуска водохранилищами выдающегося ливневого паводка независимо от его обеспеченности. Но массовые расчеты обеспеченных расходов по этой схеме для малых рек в ряде случаев оказываются затруднительными вследствие трудности учета указанных предпосылок. В связи с этим на практике иногда обращаются к другой схеме Цингера [130].

Особенности формирования максимальных расходов на малых бассейнах позволяют рассматривать процесс трансформации без тех усложнений, которые нельзя опускать для больших бассейнов. Эти особенности состоят в том, что на малых реках могут возникать неблагоприятные, но возможные гидрометеорологические комбинации, учетом которых одновременно оправдывается осторожность расчетов и упрощение их, а вместе с тем создаются реальные предпосылки к решению задачи (п. 3 § 45).

Разберем условия, свойственные образованию максимумов в каскаде водоемов на малой реке.

Поскольку конфигурация ливневой тучи, распределение в ней влагосодержания и последовательность выпадения осадков во времени могут быть по частям бассейна произвольными, допустимо считать максимумы притока с частного водосбора ниже лежащего бассейна совпадающими со сбросным максимумом из выше лежащего водохранилища. Совпадению максимумов собственной приточности со сбросным максимумом из выше лежащего водоема способствуют также сравнительно незначительные длины руслового добегания, к тому же частично по подпертым бьефам.

Снеготаяние на малых бассейнах во многих случаях также может способствовать совпадению максимумов по причинам, аналогичным вышеизложенным (различная густота гидрографической сети для частных водосборов, разные высоты снежного покрова

по участкам, имеющим разное число балок и оврагов, наличие бо́льших или меньших площадей с южными или северными склонами и т. п.). Главное же то, что снеготаяние продолжается несколько суток, в результате чего при коротких расстояниях между бьефами со сроком добегания в пределах суток или даже нескольких часов совпадение максимумов с собственного водосбора и сбросного сверху становится не менее возможным, чем при ливнях.

Таким образом, совпадение естественного максимума с частного водосбора со сбросным максимумом из выше расположенного водохранилища является вполне реальным. Эта же расчетная предпосылка принимается и Цингером. Однако с приведенной им системой расчетов согласиться нельзя. В. Н. Цингер для каждой системы водоемов редукцию к максимумам по ступеням каскада сверху вниз многократно определяет как отношение максимального расхода со всего водосбора до очередного створа к сумме двух максимумов: максимума с собственного водосбора до этого створа и максимума с водосбора до предыдущего створа (хотя на этой площади имеются свои регулирующие водоемы).

По Цингеру, редукция к максимумам с водосбора, на котором рассматривается каскад, например, из четырех водохранилищ, определяется по табл. 102 (ради краткости расчет показан лишь для четвертого створа [130]).

Таблица 102

Расчет сбросных расходов в каскаде водохранилищ (по В. Н. Цингеру)

№ створа	Площадь водосбора, км²	Максимальный расход, м³/с		Суммарный сток ΣQ, 10^3 м³	Регулирующий объем $V_т$, 10^3 м³	Трансформированный расход $q_м$ м³/с
		естественный $Q_м$	подлежащий трансформации $q'_м$			
3 общ.	31	34,5	24,2	682	300	13,5
4 части.	5	11,9		112		11,9
	Сумма	46,4			$q_м + Q_м = 25,4$	
4 общ.	36	37,6	20,6			

При этом коэффициент редукции $k_4 = 37,6 : 46,4 = 0,81$ и расход, подлежащий трансформации четвертым водохранилищем, $q'_м = 0,81 \cdot 25,4 = 20,6$ м³/с [1].

По существу же редукция должна определяться не многократно (не по сумме максимумов только с двух водосборов последовательно для каждой ступени каскада), а лишь один раз применительно ко всем частным максимумам каскада, поскольку каждое из водохранилищ производит трансформацию паводка.

---

[1] Аналогично этому был получен расход $q'_м = 24,2$ м³/с для створа 3 общ. при ином коэффициенте редукции.

Таблица 103

Расчет сбросных расходов в каскаде водохранилищ (по Я. Ф. Плешкову)

№ створа	Площадь водосбора, км²	Естественные максимальные расходы, м³/с		Расход, подлежащий трансформации, м³/с	Суммарный сток, тыс. м³		Регулирующий объем, 10^6 м³	Трансформированный расход, м³/с
		при учете частных водосборов	при учете общего водосбора		частный	общий		
Каскад из двух водохранилищ								
1	9	16,8	12,6	12,6	198	198	105	5,9
2 частн.	12	19,9	15,0	20,9	264	462	148	14,2
	Сумма	36,7	27,6					
2 общ.	21	27,6						
Каскад из трех водохранилищ								
1	9	16,8	10,6	10,6	198	198	105	5,0
2 частн.	12	19,9	12,6	17,6	264	462	148	12,0
3 частн.	10	17,9	11,3	23,3	220	682	300	13,0
	Сумма	54,6	34,5					
3 общ.	31	34,5						
Каскад из четырех водохранилищ								
1	9	16,8	9,5	9,5	198	198	105	4,45
2 частн.	12	19,9	11,3	15,7	264	462	148	10,7
3 частн.	10	17,9	10,1	20,8	220	682	300	11,7
4 частн.	5	11,9	6,74	18,4	112	794		
	Сумма	66,5	37,6					
4 общ.	36	37,6					и т. д.	

В результате расчет должен выполняться по табл. 103. При этом коэффициент редукции будет определяться лишь один раз и для указанного примера будет составлять не 0,81, а $k_4 = 37{,}6 : 66{,}5 = 0{,}565$. На этот коэффициент редукции следует умножить все частные максимумы[1] и произвести последовательную трансформацию паводка водохранилищами.

В каскаде из четырех водоемов расходы 4,45, 10,7 и 11,7 м³/с по створам № 1, 2 и 3 учитываются лишь для определения расхода в створе № 4, но не являются расчетными для размеров водосборов в створах № 1, 2 и 3. Верхний водосброс (№ 1) должен рассчитываться на обеспеченный трансформированный

[1] Определение естественных максимумов и суммарного притока по частным и общим водосборам производится общеизвестными приемами (например, по формулам Д. Л. Соколовского, Г. А. Алексеева и др.) и здесь не рассматривается.

максимум только с изолированного верхнего водосбора; второе водохранилище (с участием первого) пропускает расчетный паводок, охватывающий только два верхних водосбора, и т. д.

Расчет трансформации выполняется в следующей последовательности.

Сначала трансформируется частный редуцированный максимальный расход на верхнем водохранилище. Сбросной максимум из него суммируется с естественным редуцированным максимумом второго частного водосбора, и полученный расход трансформируется вторым водохранилищем, причем учитывается общий суммарный приток с двух водосборов. Сбросной расход из второго водохранилища суммируется с редуцированным естественным максимумом третьего частного водосбора при учете суммарного притока с трех водосборов и т. д.

Таким образом, в каскаде из любого числа водохранилищ при определении редукции учитывается работа всех водохранилищ, а не двух, как принято в работе [130]. По схеме Цингера получается, что расходы от створа к створу переходят не от одного и того же, а от разных паводков. При этом коэффициент редукции с увеличением числа водохранилищ по мере дополнения новых

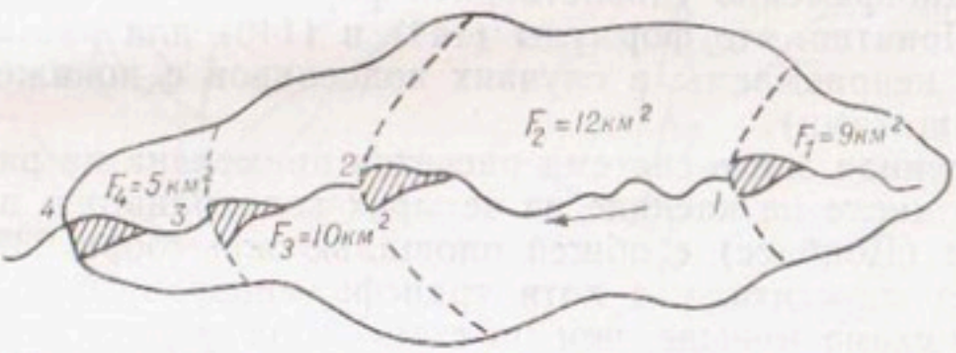


Рис. 126. Схема каскада из четырех водохранилищ (к примеру расчета).

ступеней каскада, очевидно, должен уменьшаться (согласно работе [130], упомянутый коэффициент может даже возрастать, что недопустимо). Различие также и в том, что по схеме автора редукция устанавливается и применяется для естественных максимумов, модули которых уменьшаются с увеличением водосбора. При этом расходы в расчетном створе формируются от одного и того же паводка.

В. Н. Цингер вводит редукцию к сумме трансформированных и естественных максимумов, что не соответствует естественной закономерности.

В табл. 103 трансформация паводков выполнена, как и в примере Цингера, по формуле Кочерина (127). В результате получено, что расход, подлежащий трансформации, например, четвертым водохранилищем (рис. 126), по данным Цингера равен 20,6 м³/с, а по предлагаемой схеме расчета 18,4 м³/с. Разница сравнительно невелика (11%), но она может быть различной в зависимости от разнообразных входящих в расчет параметров (максимальных рас-

ходов, суммарного притока по частям водосбора, регулирующих объемов по отдельным водоемам).

Соблюдая изложенные здесь принципы, надо помнить, что в некоторых случаях в зависимости от комбинации частных водосборов, длин тальвегов, эффекта трансформации по отдельным водохранилищам и других факторов возможна бóльшая величина обеспеченного максимума в нижнем водоеме не со всего водосбора, а с некоторых комбинаций частных бассейнов. В смысле редукции максимумов каждая из таких комбинаций должна рассматриваться как единая территория, формирующая паводок. Поэтому в сомнительных случаях необходимо проверять, будет ли сбросной максимум со всего водосбора больше трансформированных расходов с отдельных, наиболее показательных комбинаций частных бассейнов.

В случаях же, когда некоторые водохранилища каскада не проектируются, а уже существуют и рассчитывается максимум для проектируемого водосброса ниже имеющихся плотин, трансформация редуцированных максимумов на верхних водохранилищах производится путем подбора по формуле (144) или (146) и по уравнению (142) для расходов через водослив. Искомая величина $q_м$ должна одновременно удовлетворять формулам (144) [или (146)] и (142). Понятно, что формулы (144) и (146) для расчета трансформации неприемлемы в случаях водосливов с пониженным порогом (со щитами).

Приведенная здесь система расчетов применена на ряде объектов, в том числе на каскаде из четырех водохранилищ в бассейне р. Крынки (Донбасс) с общей площадью водосбора 2374 км².

Следует отметить, что хотя трансформированные расходы по указанной схеме меньше, чем по схеме Цингера, все же при этом в результатах содержится некоторый запас. Последний состоит в том, что при переходе от одного водоема к другому (сверху вниз) трансформированный расход предыдущего водоема совмещается с частным естественным (редуцированным) пиком следующего водохранилища. Как отмечено выше, это обстоятельство для малых рек является возможным. Однако на таких реках могут быть различные по времени сочетания пиков сбросных верхних и собственных (редуцированных) максимумов с опережением и отставанием их относительно друг друга в данном створе при разных ливнях. Ввиду этого назначение какой-то иной схемы последовательного сложения ординат гидрографа сбросных расходов из выше лежащего водохранилища с ординатами собственных (редуцированных) расходов оказывается неосторожным.[1]

---

[1] Так, например, в методе И. А. Железняка [23], как и в схеме В. Н. Цингера [131], допускается следующее: а) отдача стока с каждой единицы площади происходит по одному и тому же графику $q=\varphi(t)$, б) одинаковые графики отдачи стока каждой единицей площади синхронны. Для работы водосброса эти идеальные условия являются заведомо облегченными, так как предполагается, что максимальный сток с ближайших площадей уже прошел к моменту поступления максимумов с отдаленных участков.

Уместно сравнить влияние на срезку пика паводка нескольких изолированных водохранилищ и их каскада, а также роль отдельных водохранилищ в каскаде.

Учет трансформации паводка несколькими водохранилищами в существующих эмпирических формулах для расчета максимальных расходов производится совместно по всем водоемам независимо от числа, различия их и схемы расположения их на водосборе. При этом расход с учетом регулирующего влияния водохранилищ равен

$$q_м = \tau Q_м.$$

Здесь $Q_м$, $q_м$ — максимальные расходы соответственно без учета и с учетом трансформации паводка водоемами: $\tau = 1 -$

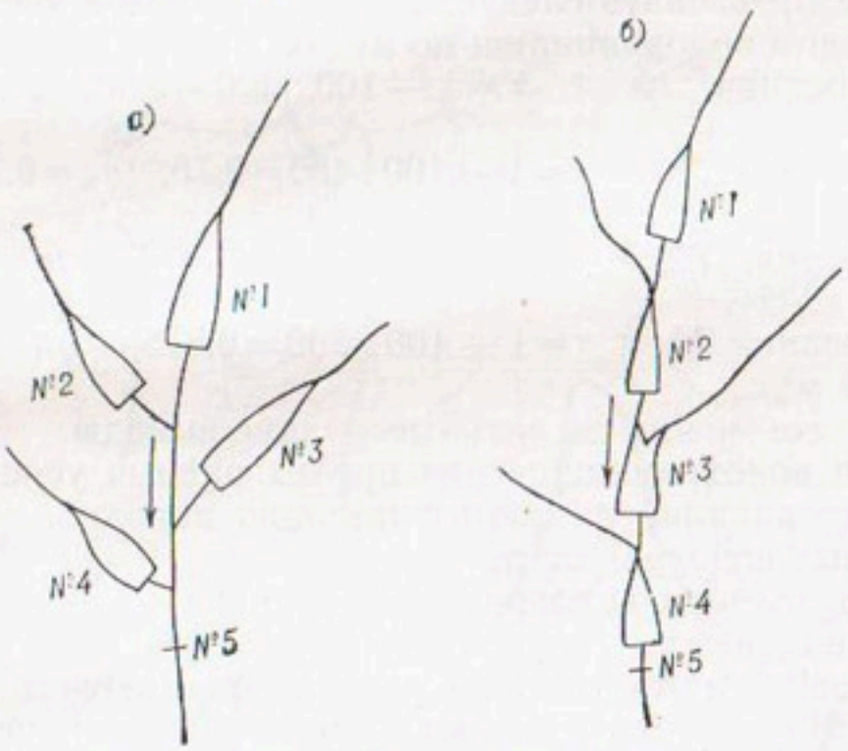


Рис. 127. Схемы расположения водохранилищ, дающие различную трансформацию паводков.

а — схема изолированных водохранилищ, *б* — каскад водохранилищ.

$- \sum V_т : \sum(\sum Q)$; $\sum V_т$ — суммарная трансформирующая емкость всех водоемов; $\sum(\sum Q)$ — общий объем паводка со всех водосборов в замыкающем (расчетном) створе.

Такой учет трансформации паводка водохранилищами приближается к учету влияния нескольких изолированных водохранилищ. (Хотя и в схеме изолированных водоемов роль каждого из них обычно неодинакова: одни могут иметь малую емкость и значительный суммарный приток паводка, другие — наоборот.) В каскаде же получается иной эффект от трансформации паводка, отличный от действия изолированных водохранилищ, работающих независимо.

Для иллюстрации различий в трансформации паводка разберем два случая: 1) несколько изолированных водохранилищ и

2) каскад их. Рассмотрим четыре одинаковых водохранилища с равными максимальными расходами $Q_м = 50$ м³/с, трансформирующими емкостями $V_т = 100$ тыс. м³ и объемами паводка $\sum Q = 200$ тыс. м³.

В первом случае эти водохранилища расположены как показано на рис. 127 *а* (если считать, что участки от плотин до расчетного створа № 5 имеют лишь транспортирующее значение). Во втором случае водохранилища расположены в виде каскада (рис. 127 *б*).

Для первого случая коэффициент регулирования паводка по каждому из водоемов одинаков и равен $\tau = 1 - 100 : 200 = 0{,}50$. При этом расход $q_м$ в створе № 5 не будет превышать $4 \cdot 50 \cdot 0{,}50 = 100$ м³/с. Для второго случая расходы $q_м$ в отдельных створах не будут превышать следующих величин (при учете трансформации каскадом водохранилищ по методу автора):

для водослива № 1 $\tau = 1 - 100 : 200 = 0{,}50$, $q_м = 0{,}50 \cdot 50 = 25$ м³/с.

для водослива № 2 $\tau = 1 - 100 : 400 = 0{,}75$, $q_м = 0{,}75(25 + 50) = 56{,}2$ м³/с;

для водослива № 3 $\tau = 1 - 100 : 600 = 0{,}833$, $q_м = 0{,}833(56{,}2 + 50) = 88{,}5$ м³/с;

для водослива № 4 $\tau = 1 - 100 : 800 = 0{,}875$, $q_м = 0{,}875(88{,}5 + 50) = 121{,}2$ м³/с.

В результате можно сделать следующие выводы.

1. Каскад водохранилищ (при прочих равных условиях) оказывает меньшее влияние на трансформацию паводка, чем комплекс изолированных водохранилищ.

2. Роль отдельных водохранилищ каскада в трансформации паводка неодинакова: регулирующее влияние каждого из последующих водохранилищ по течению реки уменьшается в связи с нарастанием объема стока и срезкой максимумов верхними водохранилищами.

3. Предложенный нами метод расчета трансформации паводков системой водохранилищ на малых реках, обеспечивая некоторый запас осторожности, дает вместе с тем величины сбросных расходов меньшие, чем по В. Н. Цингеру. Однако трансформация максимумов системой водохранилищ нуждается в дальнейшем исследовании.

Расчеты максимального стока ($Q_м$ и $\sum Q$), гидрографов половодий и паводков и их трансформации приведены в работах [17, 23, 59, 61, 93, 112, 121] и др.

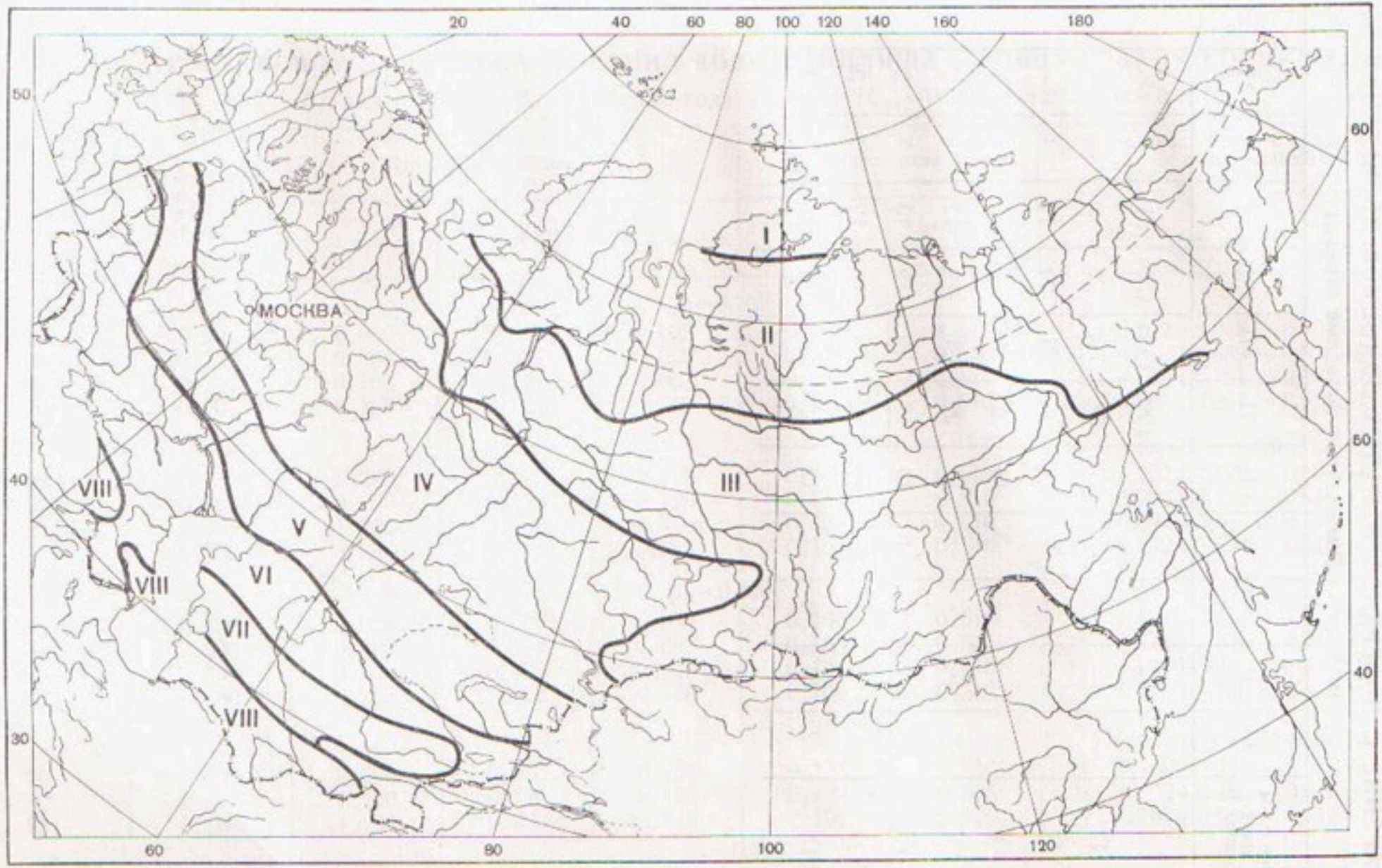


Схема районирования СССР по типу внутригодового хода испарения.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ИСПАРЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ МАЛЫХ ВОДОЕМОВ ПО МЕСЯЦАМ [124]

(в % от суммы за безледоставный период)

Номер зоны (по карте приложения 1)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	—	—	—	—	—	(20)	(45)	(30)	(5)	—	—	—
II	—	—	—	—	7	28	33	23	9	—	—	—
III	—	—	—	—	16	25	21	20	14	4	—	—
IV	—	—	—	3	16	22	21	19	12	6	1	—
V	—	—	—	6	14	20	21	19	12	6	2	—
VI	—	—	3	6	13	17	20	19	13	7	2	—
VII	—	1	4	7	13	16	19	17	12	7	3	1
VIII	2	3	4	7	12	15	16	16	12	7	4	2

35 Зак. № 574

РАСЧЕТ К ПОСТРОЕНИЮ НОМОГРАММЫ НАПОЛНЕНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩА К КОНЦУ ГОДА (К КОНЦУ МЕЖЕНИ)

$\beta_к = \varphi(\beta_н, P)$ при $\alpha = 0{,}62$ и $\beta_п = 0{,}702$ для года в целом ($C_{гг} = 0{,}55$; $C_s = 2C_{гг}$; $m = 0{,}4$)

Обеспеченность притока P%	Наполнение к началу года (к началу весны) $\beta_н$	Приток в водохранилище			Зарегулированная отдача		Расчет наполнения к концу года (к концу межени)
		за год K	за весну $0{,}6K$	за межень $0{,}4K$	за весну $1/6\alpha = 0{,}104$	за межень $5/6\alpha = 0{,}516$	1) $\beta_к^{вес} = \beta_н + 0{,}6K - \frac{1}{6}\alpha \leqslant \beta_п$ 2) $\beta_к^{меж} = \beta_к^{вес} + 0{,}4K - \frac{5}{6}\alpha \leqslant \beta_п$
				$\beta_п = 0{,}702$			
99,9	0,702	0,080	0,048	0,032	0,104	0,516	1) 0,702+0,048 — 0,104=0,646
99,9	0,702	0,080	0,048	0,032	0,104	0,516	2) 0,646+0,032 — 0,516=0,162
99	0,702	0,168	0,101	0,067	0,104	0,516	1) 0,702+0,101 — 0,104=0,699
99	0,702	0,168	0,101	0,067	0,104	0,516	2) 0,699+0,067 — 0,516=0,250
							далее со сбросом:
95	0,702	0,299	0,179	0,120	0,104	0,516	1) 0,702+0,179 — 0,104=0,702
95	0,702	0,299	0,179	0,120	0,104	0,516	2) 0,702+0,120 — 0,116=0,316
30	0,702	1,200	0,720	0,480	0,104	0,516	2) 0,702+0,480 — 0,516=0,666
25	0,702	1,294	0,776	0,518	0,104	0,516	2) 0,702+0,518 — 0,516=0,702
				$\beta_п = 0{,}600$			
99,9	0,600	0,080	0,048	0,032	0,104	0,516	1) 0,6+0,048 — 0,104=0,544
99,9	0,600	0,080	0,048	0,032	0,104	0,516	2) 0,544+0,032 — 0,516=0,060
95	0,600	0,299	0,179	0,120	0,104	0,516	1) 0,6+0,179 — 0,104=0,675
95	0,600	0,299	0,179	0,120	0,104	0,516	2) 0,675+0,120 — 0,516=0,279
							далее со сбросом:
90	0,600	0,394	0,236	0,158	0,104	0,516	2) 0,702+0,158 — 0,516=0,344
30	0,600	1,200	0,720	0,480	0,104	0,516	2) 0,702+0,480 — 0,516=0,666
25	0,600	1,294	0,776	0,518	0,104	0,516	2) 0,702+0,518 — 0,516=0,702
				$\beta_п = 0{,}500$			
99,9	0,500	0,080	0,048	0,032	0,104	0,516	1) 0,5+0,048 — 0,104=0,444
99,9	0,500	0,080	0,048	0,032	0,104	0,516	2) 0,444+0,032 — 0,516=0,00
и т. д.							

ТАБЛИЦА НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ (ЛЕТ) ПО ПЕРВОМУ (I) И ВТОРОМУ (II) МЕТОДАМ

C_{vr}	α									
	0,90		0,85		0,80		0,75		0,70	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Обеспеченность										
0,80	—	—	—	—	—	—	—	—	6, 7	—
0,70	—	—	—	—	—	—	6, 7	—	4, 5, 6	3, 4, 5
0,65	—	—	—	—	—	—	5, 6	—	4, 5	3, 4
0,60	—	—	—	—	8, 9	5, 6	4, 5, 6	4, 5	3, 4	3, 4
0,55	—	—	—	—	8	—	4, 5	—	3	3
0,50	—	—	—	—	5, 6, 7	4	3, 4	3, 4	2, 3	2, 3
0,45	—	—	6, 7, 8	—	4, 5	—	2, 3	3	2	2
0,40	—	—	5, 6, 7	4, 5	3, 4	3	2, 3	2, 3	1, 2	2
0,35	—	—	4, 5, 6	—	2, 3	—	1, 2	2	1	—
0,30	6, 7, 8	—	3, 4	3, 4	2, 3	2	1, 2	2	1	1
0,20	3, 4, 5	—	1, 2	2	1	1	1	1	1	1
0,10	1	—	1	1	—	—	—	—	—	—
Обеспеченность										
0,80	—	—	—	—	—	—	6, 7, 8	—	4, 5, 6	—
0,70	—	—	—	—	—	—	5, 6	—	3, 4	3, 4
0,65	—	—	—	—	6, 7, 8	—	4, 5, 6	—	3, 4	—
0,60	—	—	—	—	5, 6, 7	4	4	3, 4	2, 3	3
0,55	—	—	8, 9	—	4, 5, 6	4	3, 4	3	2, 3	—
0,50	—	—	6, 7, 8	—	3, 4, 5	3, 4	2, 3	3	2	2
0,45	—	—	5, 6, 7	—	3, 4, 5	3	2, 3	—	1, 2	2
0,40	—	—	4, 5, 6	3, 4	2, 3, 4	2, 3	2	2	1	1
0,35	7, 8, 9	—	3, 4, 5	—	2, 3	2	1, 2	1	1	1
0,30	5, 6, 7	—	2, 3, 4	2, 3	1, 2	2	1	1	1	1
0,20	2, 3	—	1	1, 2	1	1	1	1	—	—
0,10	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Обеспеченность										
0,80	—	—	—	—	5, 6, 7	—	4, 5	4, 5	3, 4	3, 4
0,70	—	—	—	—	4, 5, 6	—	3, 4	3, 4	2, 3	2, 3
0,65	—	—	7, 8, 9	—	4, 5, 6	—	3	3	2	2
0,60	—	—	6, 7, 8	—	3, 4	3	2, 3	2, 3	2	2
0,55	—	—	5, 6, 7	—	3, 4	3	2	2	2	2
0,50	—	—	4, 5, 6	—	2, 3	2, 3	2	2	1, 2	1, 2
0,45	6, 7, 8	—	3, 4, 5	—	2, 3	2	1, 2	1, 2	1	1
0,40	5, 6, 7	—	2, 3, 4	2	1, 2	2	1, 2	1, 2	1	1
0,35	5, 6	—	2, 3	—	1, 2	1, 2	1	1	1	1
0,30	3, 4, 5	—	1, 2	1, 2	1	1	1	1	1	1
0,20	1, 2, 3	—	1	1	1	1	—	—	—	—
0,10	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—

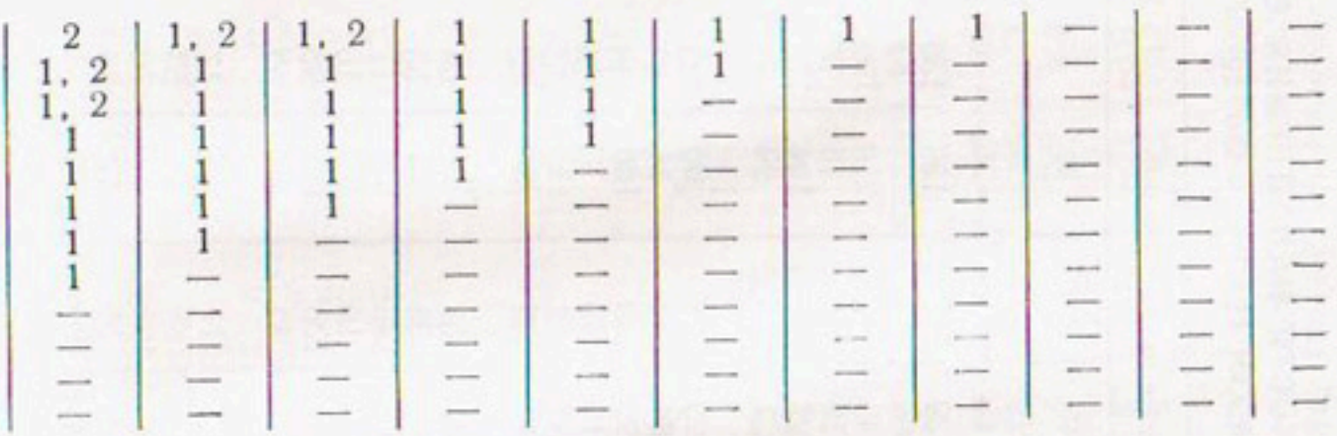
ПЕРИОДА СРАБОТКИ МНОГОЛЕТНЕЙ ЕМКОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА С. Н. КРИЦКОГО И М. Ф. МЕНКЕЛЯ

α										
0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II
отдачи $P=97\%$										
4, 5	3, 4	3	2, 3	2	2	1, 2	1, 2	1	1	1
3, 4	3	2	2	1, 2	1	1	1	1	1	—
3	2, 3	2	1, 2	1	1	1	1	1	1	—
2, 3	2	1, 2	1	1	1	1	1	1	—	—
2, 3	2	1, 2	1	1	1	1	1	—	—	—
2	1, 2	1, 2	1	1	1	1	—	—	—	—
1, 2	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—
1, 2	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—
1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
отдачи $P=95\%$										
3, 4	3	2, 3	2	1, 2	1, 2	1, 2	1	1	1	1
2, 3	2	2	1, 2	1, 2	1	1	1	1	0, 1	—
2, 3	2	1, 2	1	1	1	1	1	—	—	—
2	2	1, 2	1	1	1	1	1	—	—	—
2	1, 2	1	1	1	1	—	—	—	—	—
1, 2	1, 2	1	1	1	1	—	—	—	—	—
1, 2	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
отдачи $P=90\%$										
2, 3	2	1, 2	1	1	1	1	1	1	—	—
2	1, 2	1	1	1	1	1	1	—	—	—
1, 2	1	1	1	1	1	1	—	—	—	—
1, 2	1	1	1	1	1	—	—	—	—	—
1	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—
1	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—
1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

C_{vr}	α									
	0,90		0,85		0,80		0,75		0,70	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	Обеспеченность									
0,80	—	—	7, 8, 9	—	4, 5	—	3, 4	3, 4	2, 3	2, 3
0,70	—	—	5, 6, 7	—	3, 4	—	2, 3	2, 3	2	2
0,65	—	—	4, 5, 6	—	3	3	2	2	1, 2	1, 2
0,60	—	—	3, 4, 5	—	2, 3	2	2	2	1, 2	1, 2
0,55	7, 8, 9	—	3, 4, 5	—	2	2	1, 2	1, 2	1	1
0,50	6, 7, 8	—	2, 3, 4	—	2	2	1, 2	1, 2	1	1
0,45	5, 6, 7	—	2, 3	—	1, 2	2	1	1	1	1
0,40	4, 5, 6	2	1, 2, 3	1, 2	1	1, 2	1	1	1	1
0,35	3, 4, 5	2	1, 2	1, 2	1	1	1	1	1	1
0,30	2, 3, 4	2	1, 2	1	1	1	1	1	1	1
0,20	1, 2	1	1	1	0, 1	—	—	—	—	—
0,10	0, 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Обеспеченность									
0,80	—	—	4, 5, 6	—	3, 4	3, 4	2, 3	2, 3	1, 2	1, 2
0,70	7, 8, 9	—	3, 4, 5	—	2, 3	2, 3	1, 2	1, 2	1	1
0,65	6, 7, 8	—	3	—	2	2	1, 2	1, 2	1	1
0,60	5, 6, 7	—	2, 3, 4	—	2	2	1	1	1	1
0,55	4, 5, 6	—	2, 3	—	1, 2	1, 2	1	1	1	1
0,50	3, 4, 5	—	1, 2, 3	—	1	1	1	1	1	1
0,45	3, 4, 5	—	1, 2	—	1	1	1	1	1	1
0,40	2, 3, 4	2	1, 2	1	1	1	1	1	1	1
0,35	1, 2, 3	2	1	1	1	1	1	1	—	—
0,30	1, 2, 3	1, 2	1	1	1	1	—	—	—	—
0,20	1	1	1	1	—	—	—	—	—	—
0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Обеспеченность									
0,80	6, 7, 8	—	3, 4, 5	—	2	2	1, 2	1, 2	1	1
0,70	5, 6, 7	—	2, 3, 4	—	1, 2	1, 2	1	1	1	1
0,65	4, 5, 6	—	2, 3	—	1, 2	1, 2	1	1	1	1
0,60	3, 4, 5	—	2, 3	—	1	1	1	1	1	1
0,55	3, 4, 5	—	1, 2	—	1	1	1	1	1	1
0,50	2, 3, 4	2	1, 2	1, 2	1	1	1	1	1	1
0,45	2, 3, 4	2	1, 2	1	1	1	1	1	1	1
0,40	1, 2, 3	1	1	1	1	1	1	1	—	—
0,35	1, 2	1	1	1	1	1	—	—	—	—
0,30	1, 2	1	1	1	0, 1	0, 1	—	—	—	—
0,20	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
0,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

α										
0,65	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II	I, II

отдачи $P=85\%$



отдачи $P=80\%$



отдачи $P=75\%$



РАСЧЕТ КООРДИНАТ ЧАСТНЫХ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ НАПОЛНЕНИЯ СТАРООСКОЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА С ПОЛЕЗНОЙ ЕМКОСТЬЮ $V_п = 180 \cdot 10^6$ м^3

№ ступени	Обозначение	Обеспеченность притока и наполнения P%														
		1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	97	99	99,9
		Фаза половодья ($П_0 = 133{,}7 \cdot 10^6$ м^3, $C_{v\,п} = 0{,}55$, $C_s = 2C_{v\,п}$)														
1	*Н*	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	П	361	273	232	188	160	139	120	104	88	71	53	40	32	22	10
	С	500	412	371	327	299	278	259	243	227	210	192	179	171	161	149
	О	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	К	484	396	355	311	283	262	243	227	211	194	176	163	155	145	133
	А	0,35	1,75	3,5	7	10,5	14	17,5	21	24,5	28	31,5	33,2	34	34,6	35
2	*Н*	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
	П	361	273	232	188	160	139	120	104	88	71	53	40	32	22	10
	С	456	368	327	283	255	234	215	199	183	166	148	135	127	117	105
	О	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	К	440	352	311	267	239	218	199	183	167	150	132	119	111	101	89
	А	0,7	3,5	7	14	21	28	35	42	49	56	63	66,5	68	69,4	70
3	*Н*	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
	П	361	273	232	188	160	139	120	104	88	71	53	40	32	22	10
	С	419	331	290	246	218	197	178	162	146	129	111	98	90	80	68
	О	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	К	403	315	274	230	202	181	162	146	130	113	95	82	74	64	52
	А	0,65	3,25	6,5	13	19,5	26	32,5	39	45,5	52	58,5	61,7	63	64,3	65
4	*Н*	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	П	361	273	232	188	160	139	120	104	88	71	53	40	32	22	10
	С	378	290	249	205	177	156	137	121	105	88	70	57	49	39	27
	О	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	К	362	274	233	189	161	140	121	105	89	72	54	41	33	23	11
	А	0,2	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	19	19,5	19,8	20

№ ступени	Обозначение	Обеспеченность притока и наполнения P%														
		1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	97	99	99,9
5	H	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$П=C$	361	273	232	188	160	139	120	104	88	71	53	40	32	22	10
	O	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	K	345	257	216	172	144	123	104	88	72	55	37	24	16	6	—6
	A	0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5	9,7	9,9	10
Фаза межени ($M_0=89{,}3\cdot10^6$ м^3, $C_{вм}=C_{вг}=0{,}35$, $C_з=2C_{вм}$)																
1	H	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
	$П$	178	146	131	114	102	94	86	78	71	63	52	45	40	33	22
	C	358	326	311	294	282	274	266	258	251	243	232	225	220	213	202
	O	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
	K	188	156	141	124	112	104	96	88	81	73	62	55	50	43	32
	A	1,06	5,3	10,6	21,2	32	42,4	53	63,7	74,3	85	95,5	101	103	105	106
Расчеты для ступенек 2($H=159$) и 3($H=115$) опущены																
4	H	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
	$П$	178	146	131	114	102	94	86	78	71	63	52	45	40	33	22
	C	244	212	197	180	168	160	152	144	137	129	118	111	106	99	88
	O	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	K	94	62	47	30	18	10	2	—6	—13	—21	—32	—39	—44	—51	—62
	A	0,15	0,75	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	14,3	14,6	14,9	15

Примечание. H — наполнение водоема в интервале ступени к началу фазы, млн. м^3; $П$ — приток воды за фазу, млн. м^3; C — сумма $(H+П)$; O — отдача брутто за фазу, млн. м^3; K — наполнение водоема к концу фазы (искомые ординаты), $K=C-O$; A — абсциссы искомых точек с ординатами K ($A=0{,}01\ \Delta Pl$ мм, где ΔP, l — ширина ступени в процентах и в миллиметрах).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Н. Н. Водоснабжение. М., Госстройиздат, 1967, 532 с.
2. Абрамов С. К., Недрига В. П., Романов А. В. Защита территорий от затопления и подтопления. М., Госстройиздат, 1961, 424 с.
3. Авакян А. Б., Шарапов В. А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. М., «Энергия», 1968, 384 с.
4. Айвазьян В. Г. Определение емкости водохранилища при регулировании стока.— «Гидротехническое строительство», 1941, № 2, с. 23—26; 1956, № 10, с. 37—41.
5. Айвазьян В. Г. Выбор энергетических параметров и размеров сооружений ГЭС. М., «Наука», 1965, 136 с.
6. Андреянов В. Г. Внутригодовое распределение речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1960, 328 с.
7. Андреянов В. Г. Обобщенный метод расчета сезонного регулирования стока.— «Тр. ГГИ», 1954, вып. 43 (97), с. 52—105.
8. Андреянов В. Г. Циклические колебания стока и их использование в гидрологических расчетах.— «Тр. ГГИ», 1959, вып. 68, с. 3—49.
9. Андреянов В. Г., Воскресенский К. П., Глущенко Н. Я. Исследование повторяемости и продолжительности периодов различной водности на реках СССР.— «Тр. ГГИ», 1965, вып. 127, с. 227—276.
10. Архангельский В. А. Расчеты неустановившегося движения в открытых водотоках. М., Изд-во АН СССР, 1947, 136 с.
11. Барышников Н. Б. Расчет минимальных транзитных глубин на судоходных реках (в условиях незарегулированного стока).— «Тр. ГГИ», 1959, вып. 69, с. 138—148.
12. Бахтиаров В. А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат, 1961, 430 с.
13. Берг В. А. Основы гидротехники. Л., Гидрометеоиздат, 1963, 473 с.
14. Бернштейн Л. Б. Повышение эффективности низконапорных ГЭС (о роли ГАЭС).— «Гидротехническое строительство», 1959, № 1, с. 33—41.
15. Биндеман Н. Н. Гидрогеологические расчеты подпора грунтовых вод и фильтрации из водохранилищ. М., Углетехиздат, 1951, 71 с.
16. Блохинов Е. Г. Новые приемы для оценки параметров случайных колебаний речного стока по данным многолетних наблюдений.— «Тр. ГГИ», 1968, вып. 143, с. 134—185.
17. Боголюбов С. Н. Методика проектирования гидрографов снегового половодья равнинных рек ЕТС.— «Тр. НИУ ГУГМС», 1946, сер. 4, вып. 39, с. 60—104.
18. Браславский А. П. и Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. Л., Гидрометеоиздат, 1954, 212 с.
19. Владыченский С. А. Сельскохозяйственная мелиорация почв. М., Изд-во МГУ, 1964, 416 с.
20. Водные ресурсы и водный баланс территории Советского Союза. Л., Гидрометеоиздат, 1967, 199 с.

21. Воскресенский К. П. Норма и изменчивость годового стока рек СССР. Л., Гидрометеоиздат, 1962, 546 с.
22. Волжско-Камский каскад. Под ред. Г. А. Руссо. М., Госэнергоиздат, 1960, 272 с.
23. Гидрологические расчеты для рек УССР (на укр. языке). Киев, Изд-во АН УССР, 1962, 387 с.
24. Гидроэнергетические ресурсы СССР. М., «Наука», 1967, 599 с.
25. Гильденблат Я. Д. и Казак В. Р. О выборе обеспеченности при расчете водохранилищ для промышленного водоснабжения.— В кн.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1950, с. 82—104.
26. Гильденблат Я. Д. и Коренистов Д. В. О вероятностном расчете компенсационного регулирования стока.— «Тр. Гидропроекта», 1960, сб. 4, с. 166—182.
27. Горнштейн В. М. Наивыгоднейшие режимы работы ГЭС в энергосистемах. М., Госэнергоиздат, 1959, 248 с.
28. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения. М., Госстройиздат, 1962, 763 с.
29. Губин Ф. Ф. Гидроэлектрические станции. М., Госэнергоиздат, 1949, 752 с.
30. Давыдов В. К. Испарение с водной поверхности в Европейской части СССР.— «Тр. НИУ ГУГМС», сер. 4, вып. 12, 1944, 20 с.
31. Данилевский В. В. История гидросиловых установок России до XIX в. М., Госэнергоиздат, 1940, 208 с.; «Гидротехническое строительство», 1947, № 11, с. 10—17; 1957, № 11, с. 15—26.
32. Дружинин И. П., Маматканов Д. Обобщенный прием расчета многолетнего регулирования речного стока. Фрунзе, «Илим», 1967, 60 с.
33. Елпидинский А. Я. Кривые обеспеченности суточных расходов и их применение к расчетам энергоресурсов рек.— «Тр. ГГИ», 1948, вып. 9 (63), с. 5—44.
34. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории СССР.— «Тр. НИУ ГУГМС», 1946, сер. 4, вып. 24, 147 с.
35. Зайков Б. Д. Средний сток и его распределение в году на территории Кавказа.— «Тр. НИУ ГУГМС», 1946, сер. 4, вып. 40, 64 с.
36. Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР.— «Тр. ГГИ», 1949, вып. 21, 54 с.
37. Захаров В. П. Применение математического анализа к расчетам сезонно-годового регулирования.— «Гидротехническое строительство», 1940, № 11, с. 25—27.
38. Захаров В. П. и Чокин Ш. Ч. Обобщенный прием расчетов многолетнего регулирования стока.— «Гидротехническое строительство», 1950, № 3, с. 16—20.
39. Захаров В. П. и Ким В. Я. Непрерывная периодичность гидрологического процесса как методическая основа водохозяйственных расчетов.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 1. Алма-Ата, «Наука», 1963, с. 73—100.
40. Захаров В. П., Ким В. Я., Чокин Ш. Ч. Методика практических расчетов обеспеченности работы ГЭС.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 1. Алма-Ата, «Наука», 1963, с. 10—52.
41. Зузик Д. Т. Экономика водного хозяйства. М., «Колос», 1966, 463 с.
42. Иванов Г. П. Метод расчета многолетнего регулирования стока.— «Тр. 1 совещания по регулированию стока». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946, с. 161—172.
43. Калинин Г. П. Основы методики краткосрочных прогнозов водного режима.— «Тр. ЦИП», 1952, вып. 28, 166 с.
44. Караушев А. В. Гидравлика рек и водохранилищ. Л., «Речной транспорт», 1955, 292 с.
45. Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1967, 291 с.
46. Картвелишвили Н. А. Регулирование речного стока. Л., Гидрометеоиздат, 1970, 218 с.
47. Керцелли Л. И. и Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции М., Госэнергоиздат, 1956, 488 с.

48. Киктенко В. А. Приемы расчетов комплексного регулирования стока рек с резко выраженным весенним половодьем (применительно к условиям полупустынных районов Казахстана). Изв. АН КазССР, сер. энерг., 1955, вып. 9, с. 68—94.

49. Киктенко В. А. Обобщенный расчет многолетнего регулирования стока на двух потребителей с разной обеспеченностью отдачи.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. Вып. 4, 1966, с. 81—101; вып. 2, 1964, с. 114—133; вып. 3, 1965, с. 74—94; вып. 5, 1967, с. 122—129; вып. 6, 1968, с. 156—169; вып. 7, 1970, с. 68—79; вып. 8, 1971, с. 179—191; вып. 9, 1972, с. 96—106. Алма-Ата, «Наука».

50. Клибашев К. П., Горошков И. Ф. Гидрологические расчеты, 2-е изд. Л., Гидрометеоиздат, 1970, 460 с.

51. Коваленко Б. Г. Последовательность сработки водохранилищ регулируемых ГЭС энергосистемы.— «Гидротехническое строительство», 1957, № 12, с. 17—21.

52. Коренистов Д. В. Исследования к выбору обеспеченной и установленной мощностей гидростанции, работающей с суточным регулированием в энергосистеме.— В кн.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 4. М., Изд-во АН СССР, 1950, с. 46—81.

53. Костяков А. Н. Основы мелиорации. М., Сельхозгиз, 1960, 622 с.

54. Кочерин Д. И. Вопросы инженерной гидрологии. М.—Л., Госэнергоиздат, 1932, 208 с.

55. Кочукова Т. Н. Колебания годового стока рек СССР.— «Тр. ГГИ», 1955, вып. 50 (104), с. 56—116.

56. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. О приемах исследования случайных колебаний речного стока.— «Тр. НИУ ГУГМС», 1946, сер. 4, вып. 29, с. 3—32.

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

58. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. и Россинский К. И. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. М., Госэнергоиздат, 1947, 155 с., «Гидротехническое строительство», 1944, № 1/2, с. 11—16.

59. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Гидрологические основы речной гидротехники. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950, 391 с.

60. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Расчеты многолетнего регулирования речного стока на основе теории вероятностей.— «Тр. ВИСУ», Гидротехнический сборник, № 4, 1932, с. 7—31.

61. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Л., Гидрометеоиздат, 1952, 392 с.

62. Крицкий С. Н. и Менкель М. Ф. Обобщенные методы и номограммы для водноэнергетического расчета.— «Гидротехническое строительство», 1944, № 5/6, с. 3—7.

63. Куделин Б. И. Береговое регулирование поверхностного стока.— Доклады АН СССР, 1950, т. XXI, № 1, с. 133—136.

64. Кузнецов И. А. О методике построения плана комплексного использования водных ресурсов.— В кн.: Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 25—52.

65. Кузин П. С. Многолетние колебания водности рек СССР.— «Тр. ГГИ», 1953, вып. 38 (92), с. 188—215.

66. Кузник И. А. Потери на фильтрацию из водохранилищ Заволжья.— «Гидротехническое строительство», 1947, № 10, с. 23—27.

67. Кузник И. А. О сроках заиления прудов в Поволжье.— «Гидротехника и мелиорация», 1957, № 5, с. 13—22.

68. Лопатин Г. В. Карта модуля стока наносов рек СССР.— В кн.: Вопросы гидрологии. М., Изд-во МГУ, 1957, с. 126—129.

69. Лузанская Д. И. Рыбохозяйственное использование внутренних водоемов СССР (озер, рек, водохранилищ). Справочник. М., «Пищевая промышленность», 1965, 599 с.

70. Ляпичев П. А. Методика регулирования речного стока. М., Госстройиздат, 1955, 390 с.
71. Мелещенко Н. Т. и Якубов М. С. Методика расчета неустановившегося движения в открытых руслах по методу С. А. Христиановича.— «Изв. ВНИИГ», 1948, т. 48, с. 29—70.
72. Методика определения экономической эффективности гидроэлектростанций СССР. М., Госэнергоиздат, 1961, 60 с.
73. Никитин С. Н. Основы гидроэнергетических расчетов. М., Госэнергоиздат, 1959, 510 с.
74. Огиевский А. В. Гидрология суши. М., Сельхозгиз, 1952, 515 с.
75. Орлова А. П. Расчеты компенсированного регулирования стока по балансовым разностям.— «Тр. НИИ энергетики АН УзССР», 1956, вып. 9, с. 96—116.
76. Плешков Я. Ф. Водохранилище с отсеком.— «Гидротехническое строительство», 1938, № 10, с. 29—31.
77. Плешков Я. Ф. Регулирование речного стока. 2-е изд. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 507 с.
78. Плешков Я. Ф. Влияние гидрологических изменений и ошибок на отдачу водохранилищ.— В кн.: Проблемы регулирования речного стока, вып. 5. М., Изд-во АН СССР, 1952, с. 239—261.
79. Плешков Я. Ф. Определение вероятных водохозяйственных характеристик каскадно расположенных водохранилищ.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 3. Алма-Ата, «Наука», 1965, с. 96—102.
80. Плешков Я. Ф. Упрощенный метод многолетнего компенсирующего регулирования стока.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 5. Алма-Ата, «Наука», 1967, с. 130—139; в кн.: Проблемы охраны вод, вып. 1. Харьков, ВНИИВО, 1972, с. 106—115; в Бюллетене по водному хозяйству, вып. 10. М., Изд-во СЭВ, 1972, с. 127—132.
81. Плешков Я. Ф., Сепита Н. И. Метод учета асинхронности осадков и стока как водных ресурсов для орошения.— Бюллетень по водному хозяйству, вып. 4. М., Изд-во СЭВ, 1969, с. 78—86; в кн.: Проблемы охраны вод, вып. 2. Харьков, ВНИИВО, 1973, с. 59—68.
82. Плешков Я. Ф. Пусковой период водохранилищных ГРЭС и роль мертвого объема водохранилища.— «Электрические станции», 1957, № 12, с. 28—32.
83. Плешков Я. Ф. К выбору основных размеров водосбросных сооружений.— «Гидротехническое строительство», 1939, № 1, с. 1—5.
84. Плешков Я. Ф. О вероятности максимальных ливневых расходов.— «Метеорология и гидрология», 1949, № 2, с. 166—168.
85. Плешков Я. Ф. Солевой режим водохранилищ (теория и инженерный расчет).— «Гидрохимические материалы», т. 19. М., Изд-во АН СССР, 1951, с. 55—124; в кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 2. Алма-Ата, «Наука», 1964, с. 214—218; в кн.: Проблемы охраны вод, вып. 2. Харьков, ВНИИВО, 1973, с. 134—139.
86. Плешков Я. Ф. К выбору размеров накопителей сточных вод.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4. 1966, с. 144—147; вып. 9, 1972, с. 131—139. Алма-Ата, «Наука»; в кн.: Проблемы охраны вод, вып. 1, 1972, с. 97—105; вып. 2, 1973, с. 139—147. Харьков, ВНИИВО.
87. Плешков Я. Ф. Расчеты режимов сброса-подпитки водоемов-охладителей для их опреснения.— В кн.: Водоснабжение, канализация, гидротехнические сооружения, вып. 13. Киев, «Будивельник», 1971, с. 29—38.
88. Подземный сток на территории СССР. Под ред. Б. И. Куделина. М., Изд-во МГУ, 1966, 303 с.
89. Поляков Б. В. Определение связи между подземными водами и поверхностным стоком.— «Тр. ЦИП», 1947, вып. 2, 64—112.
90. Попов О. В. Подземное питание рек. Л., Гидрометеоиздат, 1968, 291 с.
91. Потапов М. В. Сочинения, т. III. М., Сельхозгиз, 1951, 479 с.
92. Правила охраны поверхностных вод от загрязнения сточными водами. М., Изд-во Министерства здравоохранения СССР, 1961, 30 с.
93. Руководство по определению расчетных гидрологических характеристик. Л,. Гидрометеоиздат, 1973, 111 с.

94. Раткович Д. Я. и Рослова Н. В. Методика расчетов заиления водохранилищ.— «Тр. Гидропроекта», 1964, сб. 12, с. 272—285.

95. Резниковский А. Ш., Рубинштейн М. И. О построении диспетчерских графиков работы комплексных водохранилищ многолетнего регулирования стока.— В кн.: Оптимальные режимы работы ГЭС в энергосистемах, вып. 1. М., «Энергия», 1966, с. 35—48.

96. Резниковский А. Ш., Гладкова С. П., Зубарев В. В. Водноэнергетические расчеты методом Монте-Карло. Под ред. А. Ш. Резниковского. М., «Энергия», 1969, 303 с.

97. Ресурсы поверхностных вод СССР, т. 6, вып. 3. Л., Гидрометеоиздат, 1967, 492 с.

98. Розин В. А. Мелиорация с основами сельскохозяйственного водоснабжения. М.—Л., Сельхозгиз, 1954, 344 с.

99. Руководящие указания по выбору оптимальных режимов совместно работающих гидравлических и тепловых электростанций. М., Госэнергоиздат, 1956, 112 с.

100. Русловые процессы. Сборник статей. М., Изд-во АН СССР, 1958, 395 с.

101. Руффель М. А. Расчеты разбавления сточных вод в водохранилищах.— «Водоснабжение и санитарная техника», 1957, № 7, с. 13—19.

102. Рыбкин С. И. Статистический опыт к расчету многолетнего регулирования стока на основе теории вероятностей и его результаты.— «Тр. 1 совещания по регулированию стока». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946, с. 23—39.

103. Рыбкин С. И. Метод расчета на основе теории вероятностей основных водохозяйственных характеристик водохранилищ при многолетнем регулировании стока.— «Тр. 1 совещания по регулированию стока». М.—Л., Изд-во АН СССР, 1946, с. 98—129.

104. Рыбкин С. И. Номограммы для расчета графиков притока криволинейного очертания.— «Гидротехническое строительство», 1940, № 7, с. 40—43.

105. Рыбкин С. И. Эмпирические формулы и номограммы для расчета многолетнего регулирования речного стока.— «Гидротехническое строительство», 1938, № 1, с. 3—10.

106. Саваренский А. Д. Метод расчета регулирования стока.— «Гидротехническое строительство», 1940, № 2, с. 24—28.

107. Саваренский А. Д. Регулирование речного стока водохранилищами. М., Изд-во АН СССР, 1951, 236 с.

108. Сванидзе Г. Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси, «Мецниереба», 1964, 271 с.

109. Сиваков Е. Р. Насосно-аккумулирующие гидроэлектростанции. Л.—М., Госэнергоиздат, 1952, 100 с.

110. Скворцов Б. П. Метод выбора основных параметров водохранилищ для условий мелиоративно-энергетического комплекса.— Изв. АН БССР, сер. физико-техн. наук, 1958, № 4, с. 61—65.

111. Соколов А. А. Гидрография СССР. Л., Гидрометеоиздат, 1964, 535 с.

112. Соколовский Д. Л. Речной сток. Л., Гидрометеоиздат, 1968. 539 с.

113. Сомов Н. В. Асинхронность колебания стока крупных рек СССР.— «Метеорология и гидрология», 1963, № 5, с. 14—21; «Тр. ЦИП», 1963, вып. 117, с. 180—214.

114. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Водоснабжение населенных мест и промышленных предприятий. М., Госстройиздат, 1967, 382 с.

115. Стельмах П. В. Определение гарантированной отдачи заданной обеспеченности при компенсирующем регулировании стока.— «Тр. Всесоюз. совещания по изучению стока, регулированию стока и зимнему режиму». М., Изд-во АН СССР, 1954, с. 80—82.

116. Строительные нормы и правила СНиП П-Г, 3-62. Водоснабжение. Нормы проектирования. М., Госстройиздат, 1963, 94 с.

117. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в народном хозяйстве. М., Госпланиздат, 1960, 22 с.

118. Технические указания к расчету прудов-охладителей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 105 с.

119. Управление поверхностными и подземными водными ресурсами и их использование. М., Изд-во АН СССР, 1961, 247 с.

120. Указания по проектированию сельскохозяйственного водоснабжения СН 267-63. М., Госстройиздат, 1963, 24 с.

121. Указания по определению расчетных гидрологических характеристик СН 435-72. Л., Гидрометеоиздат, 1972, 19 с.

122. Указания по методике определения экономической эффективности капитальных вложений и новой техники в мелиорации. М., Сельхозгиз, 1961, 32 с.

123. Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании. ГУГМС и МЭиЭ СССР. Л., Гидрометеоиздат, 1968, 55 с.

124. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л., Гидрометеоиздат, 1969, 83 с.

125. Укрупненные нормы расхода воды и количества сточных вод на единицу продукции для различных отраслей промышленности. СЭВ «ВОДГЕО» Госстроя СССР. М., Госстройиздат, 1973, 367 с.

126. Урываев В. А. Обеспеченность расходов в году рек Европейской части СССР.— «Тр. НИУ ГУГМС», 1941, вып. 2, с. 30—63.

127. Фаворин Н. Н. Искусственное пополнение подземных вод. М., «Наука», 1967, 199 с.

128. Федоров Л. Т. О грунтовом водообмене рек.— «Тр. Гидропроекта», 1960, сб. 4, с. 24—47.

129. Цветков Е. В. Расчет оптимального регулирования стока водохранилищами ГЭС на ЦВМ. М., «Энергия», 1967, 135 с.

130. Цингер В. Н. Схема учета трансформации максимальных расходов системой водохранилищ.— «Гидротехника и мелиорация», 1951, № 7, с. 30—34.

131. Цингер В. Н. Трансформация максимальных расходов водохранилищами.— «Тр. ГГИ», 1956, вып. 52 (106), с. 141—189.

132. Чеботарев В. И. Гидрологические и водноэнергетические расчеты сельских ГЭС. Л., Гидрометеоиздат, 1958, 444 с.

133. Черкасов А. А. Мелиорация и сельскохозяйственное водоснабжение. М., Сельхозгиз, 1950, 536 с.

134. Черкинский С. Н. Санитарные условия спуска сточных вод в водоемы. М., Стройиздат, 1971, 208 с.

135. Чокин Ш. Ч. Расчетная обеспеченность работы ГЭС. Алма-Ата, Изд-во АН КазССР, 1958, 271 с.

136. Чокин Ш. Ч., Григорьев В. А., Редькин В. К. Номограммы для расчета регулирования речного стока.— В кн.: Вестник АН КазССР, № 9 (329), 1972, с. 36—42; в кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, 1973, вып. 10, с. 60—70. Алма-Ата, «Наука».

137. Чокин Ш. Ч., Григорьев В. А., Редькин В. К. Обобщенный метод расчета регулирования стока при однотактном режиме работы водохранилища.— В кн.: Проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства, вып. 4, 1966, с. 49—65; вып. 5, 1967, с. 101—111; вып. 6, 1968; с. 144—155; вып. 7, 1970, с. 37—47; вып. 8, 1971, с. 152—160; вып. 9, 1972, с. 85—95. Алма-Ата, «Наука».

138. Шамов Г. И. Заиление водохранилищ. Л.—М., Гидрометеоиздат, 1939, 140 с.

139. Шамов Г. И. Речные наносы. Л., Гидрометеоиздат, 1959, 378 с.

140. Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. ВНИИ «ВОДГЕО», М., 1961, 100 с.

141. Шестаков В. М. Смешение сточных вод в реках.— «Водоснабжение и санитарная техника», 1961, № 7, с. 15—18.

142. Шимельмиц И. Я., Баранов В. А., Резниковский А. Ш. Об эффективности учета асинхронности и цикличности колебания речного стока для крупных энергетических объединений.— В кн.: Многолетние колебания стока и вероятностные методы его расчета. М., Изд-во МГУ, 1967, с. 25—34.

143. Шипенко П. И. О потерях на фильтрацию из водохранилищ.— В кн.: Науч. записки МГМИ, т. 7, вып. 13 и 8, 1939.

144. Шапов Н. М. Турбинное оборудование гидростанций. М., Госэнергоиздат, 1961, 319 с.

145. Шавелев Д. С., Васильев Ю. С., Вельнер Х. А. Использование водной энергии. М., «Энергия», 1965, 564 с.

146. Dhir R. D., Ahuja P. R., Krishnamurthy. Fixation of storage of capacity of reservoirs. New Delhi, 1954.
147. Fathy A., Shukry S. The problem of reservoir capacity for long—term storage Y. Hidraulics Div, Proceedings ASCE, v. 82, N 5—6, 1956.
148. Fiering M. B. Queuing. Theory and simulation in reservoir design. J. Hydraulics Div., Proceedings ASCE, HY6, November, 1961.
149. Hazen A. Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. Trans. ASCE, 1914.
150. Hurst H. E. The Nill: a general account of the river and the utilisation of its water. London, 1958.
151. Langbein W. B. Queuing theory and water storage. Proceedings ASCE, v. 84, NHY5, October, 1958.
152. Lang. Determination of storage reservoir capacity. Inst. Eng. Australia, Melbourne Division, 1947.
153. Moran P. A. P. The Theory of storage. London—New York, 1959.
154. Sudler Ch. E. Storage required for the regulation of stream flow. Trans. ASCE, 1927.
155. Dick S. und Glos E. Langfristiger Ausgleich natürlicher Abflussschwankungen der Flüsse durch Talsperren. Wasserwirtschaft und Technik, N 1, 1957, p. 3—8.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Глава I. **Основные сведения о водном хозяйстве и речном стоке** . . . 5
§ 1. Общие сведения о водном хозяйстве . . . . . —
§ 2. Данные о стоке как основа водохозяйственных расчетов 17
Глава II. **Водопотребление, водопользование и их обеспеченность** . . . 29
§ 3. Водопотребление и водопользование . . . . . —
§ 4. Обеспеченность водопотребления и водопользования 55
Глава III. **Водохозяйственные установки и основные характеристики водохранилищ** 68
§ 5. Исследование режима работы установки . . . . . —
§ 6. Водохранилища и их основные характеристики 71
§ 7. Мертвый объем и заиление водохранилища 80
§ 8. Потери воды из водохранилища и борьба с ними. Грунтовые водоемы 84
Глава IV. **Основные методы расчетов регулирования стока. Расчеты по календарным величинам стока на жесткий график водоотдачи** 104
§ 9. Виды регулирования стока. Показатели регулирования и методы его расчетов . . . . . —
§ 10. Расчеты регулирования по хронологическому ряду величин стока 124
Глава V. **Обобщенные методы расчетов регулирования стока на жесткий график водоотдачи** 146
§ 11. Методы расчета многолетней составляющей емкости водохранилища и расчетные графики 147
§ 12. Учет сезонных колебаний стока и заданного водопотребления 167
§ 13. Определение всей рабочей емкости, не делимой на составляющие, без учета и с учетом межсезонной связи стока 175
Глава VI. **Элементы режима водохранилища в проектных условиях и при отклонении от них** 192
§ 14. Определение периодов сработки водохранилища расчет полезной отдачи и сбросов . . . . . —
§ 15. Характеристика неустановившейся работы водохранилища (периоды первоначального наполнения и перебоев) 205
§ 16. Влияние изменений характеристик стока, емкости и водопотребления на результаты регулирования 215
Глава VII. **Регулирование стока на переменную отдачу (по диспетчерским правилам) и при случайных колебаниях водопотребления** 218
§ 17. Определение и расчетные предпосылки . . . . . —
§ 18. Приемы построения характерных линий диспетчерского графика 223
§ 19. Построение диспетчерского графика для многолетнего регулирования стока при ограниченности гидрометрических данных . . 233
§ 20. Применение диспетчерских графиков, их эффективность и взаимосвязь с водохозяйственными расчетами. Пример построения диспетчерского графика 237
§ 21. Учет случайных колебаний водопотребления при регулировании стока для орошения 254
Глава VIII. **Регулирование стока на две обеспеченности водопотребления** 262
§ 22. Исходные положения и методика расчета . . . . . —
§ 23. Обобщение результатов расчета к построению номограмм и определение многолетней диспетчерской емкости 272
§ 24. Область применения номограмм и расчет каскадно расположенных водохранилищ 280
§ 25. Регулирование стока для любых водопотребителей с произвольной обеспеченностью 285
Глава IX. **Регулирование стока для тепловых электростанций** 291
§ 26. Водопотребление ГРЭС и его обеспеченность 292
§ 27. Расчет охлаждения воды в пруде и потерь на испарение от подогрева 298

§ 28. Выбор параметров водохранилища и мощности тепловой электростанции (по водным ресурсам) 305
§ 29. Роль мертвого объема водохранилища тепловой электростанции 313
§ 30. Режим работы водохранилища и ГРЭС в пусковой период (на примере М-ГРЭС) 315
Глава X. **Регулирование стока для гидростанций** 320
§ 31. Общие сведения. Параметры ГЭС и ее оборудования . . . . . —
§ 32. Обеспеченность работы ГЭС и выбор характерных лет (периодов) 338
§ 33. Виды гидроэнергетического регулирования стока 342
§ 34. Определение параметров водохранилища и ГЭС 362
§ 35. Диспетчерские графики, энергобалансы и другие характеристики работы ГЭС 375
Глава XI. **Расчеты системы установок при независимом и компенсирующем регулировании стока на жесткий график водоотдачи и для энергетики** 391
§ 36. Компенсирующее регулирование стока системой водохранилище — водозабор 392
§ 37. Регулирование стока каскадом или системой водохранилищ с независимой водоотдачей 416
§ 38. Каскадное и обособленное компенсирующее регулирование стока для энергетики 433
Глава XII. **Изменение качества воды при регулировании стока. Охрана водных ресурсов от загрязнений** 443
§ 39. Предпосылки к регулированию стока по качеству воды . . . —
§ 40. Аналитическое обобщение процесса минерализации воды при регулировании стока 451
§ 41. Расчеты минерализации воды в водоемах ГРЭС и мероприятия по ее изменению 458
§ 42. Локализация промышленных сточных вод и накопители как средство санитарной охраны водных объектов 473
Глава XIII. **Регулирование стока половодий и паводков** 489
§ 43. Расчетные нормативы и учет ретрансформации высоких вод. Береговое регулирование . . . . . —
§ 44. Построение гидрографов высоких вод 496
§ 45. Трансформация половодий и паводков водохранилищем . . . 503
§ 46. Технико-экономические и водохозяйственные задачи регулирования половодий и паводков. Борьба с наводнениями 524
§ 47. Трансформация высоких вод системой водохранилищ на малых реках 536
Приложения 543
Список литературы 552

Яков Федорович Плешков

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА

Редактор *З. М. Кожина*. Переплет художника *В. А. Баканова*. Техн. редактор *В. И. Семенова*
Корректор *Г. С. Макарова*

Сдано в набор 19/XI 1974 г. Подписано в печать 18/II 1975 г. М-17063. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага тип. № 1. Печ. л. 35,25 (в т. ч. 1 вкл.). Уч.-изд. л. 40,24. Тираж 5000 экз. Индекс ГЛ-56. Заказ 574. Цена 2 р. 78 к. Гидрометеоиздат. 199053, Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000. Ленинград, Прачечный пер., д. 6.