

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович
Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет
Дата подписания: 30.03.2026 16:17:55
Уникальный программный ключ:
528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

Афонин В.В.

Методические указания к выполнению курсовых работ по дисциплине «Гидроузлы комплексного назначения. Регулирование стока»

Саратов 2024

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и
инженерии
имени Н.И. Вавилова

Афонин В.В.

**Методические указания к выполнению курсовых работ
по дисциплине «Гидроузлы комплексного назначения.
Регулирование стока»**

Издательство Вавиловского университета

2024

УДК 627.81 (075.8)
ББК 26.222
Б 51

Афонин В.В., Методические указания к выполнению курсовых работ по дисциплине «Гидроузлы комплексного назначения. Регулирование стока» - Саратов: Изд-во Вавиловского университета, 2024.- 67 п.л..

1. Построение батиграфической и объемной характеристик водохранилища

Построение батиграфических характеристик водохранилища сводится к установлению следующих зависимостей:

- 1) между объемом и уровнем воды, $V = f(H)$ - кривая объемов;
- 2) между площадью зеркала и уровнем воды, $\omega = f(H)$ - кривая площадей водной поверхности;
- 3) между средней глубиной и уровнем воды, $h_{cp} = f(H)$ - кривая средних глубин.

Кроме этого характеристикой водохранилища является также критерий площади литорали (мелководья), $L_{\omega} = f(H)$ - кривая критерия литорали.

Исходными материалами для построения кривой площадей служат крупномасштабные топографические карты. Принимая поверхность воды горизонтальной, планиметрированием определяют площади ω , соответствующие различным уровням воды H и заключенные между отдельными горизонталями и створом плотины, замыкающим горизонтали у берегов (рис. 1.1, а).

Элементарные объемы ΔV отдельных слоёв воды между смежными парами горизонталей определяют по формуле:

$$\Delta V = 0,5(\omega_i + \omega_{i+1})\Delta H_i, \quad (1.1)$$

где ω_i и ω_{i+1} - площади, ограниченные соседними горизонталями, т.е. соответствующие уровням воды H_i и H_{i+1} , м²; ΔH_i - разность глубин между двумя отметками уровня, м, $\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$.

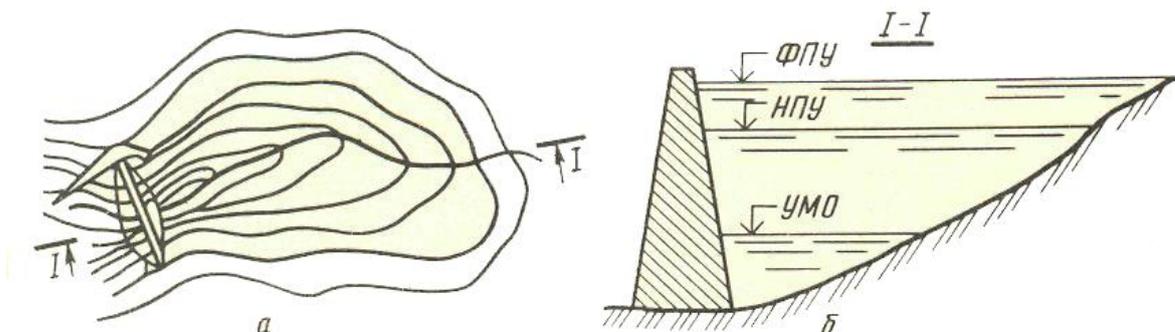


Рис. 1.1 План (а) и продольный профиль (б) водохранилища

Объем воды в водохранилище V_i при любой отметке уровня вычисляют путем последовательного суммирования объемов отдельных слоев, начиная с самого низкого:

$$V_{H_i} = \sum_{H_0}^{H_i} \Delta V_i, \quad (1.2)$$

По полученным данным строят кривую объемов водохранилища: $V = f(H)$ (рис. 1.2).

Среднюю глубину водохранилища находят по формуле:

$$h_{cp} = V_{H_i} / \omega_{H_i}, \quad (1.3)$$

и строят кривую зависимости средней глубины водохранилища от отметки зеркала воды: $h_{cp} = f(H)$ (рис. 1.2).

К мелководной зоне водохранилища относят его прибрежную часть глубиной $h \leq 2$ м. Площадь этой зоны, m^2

$$\omega_{L_i} = \omega_{H_i} - \omega_{H_i-2}, \quad (1.4)$$

где ω_{H_i-2} – площадь водной поверхности водохранилища, соответствующая уровню воды $H = H_i - 2$ м, которую определяют по кривой $\omega = f(H)$ (см. рис. 1.2), m^2 .

Критерий литорали L_{ω_i} – отношение площади литорали к площади зеркала при той же отметке H_i :

$$L_{\omega_i} = \omega_{L_i} / \omega_{H_i} \quad (1.5)$$

По полученным результатам строят кривую критерия площади литорали $L_{\omega} = f(H)$ (рис. 1.2).

Из формул (1.4) и (1.5) следует, что если уровень воды у плотины превышает отметку дна водохранилища не более чем на 2 м, то $\omega_{H_i-2} = 0$ и, следовательно, $\omega_{L_i} = \omega_{H_i}$, а критерий литорали $L_{\omega_i} = 1$. С повышением уровня воды критерий литорали уменьшается.

Расчет, указанных характеристик производится в табличной форме (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Расчет батиграфических кривых водохранилища

Отметка уровня воды H_i , м	Глубина, м	Площадь зеркала, км ²		Разность отметок ΔH , м	Объем, млн. м ³		Средняя глубина на h_{cp} , м	Литораль	
		ω_i	ω_{cp}		объём отд. слоя ΔV_i	объём м V_{Hi}		площадь ω_{Li}	критерий L_ω
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
116	0	0			0	0	0	0	
118	2	16	8	2	16	16	1	16	1,00
120	4	34	25	2	50	66	1,94	15	0,44
122	6	52	43	2	86	152	2,92	18	0,35
124	8	72	67	2	134	286	3,97	20	0,28
126	10	96	84	2	168	454	4,72	24	0,25
128	12	120	108	2	216	670	5,59	24	0,20
130	14	148	134	2	268	938	6,35	28	0,19
132	16	180	164	2	328	1266	7,02	32	0,18
134	18	216	198	2	396	1662	7,70	36	0,27
136	20	254	235	2	470	2132	8,40	38	0,15
138	22	300	277	2	554	2686	8,96	46	0,15
140	24	350	325	2	650	3336	9,50	50	0,14

По полученным в табл. 1.1 результатам строится батиграфическая характеристика водохранилища (рис.1.2).

Наряду с батиграфическими обычно строят также объемные кривые – кривые наполнения, площади водной поверхности и средней глубины водохранилища в зависимости от объема воды в нем: $H = f(V)$, $\omega = f(V)$; $h_{cp} = f(V)$ (см. рис. 2.3).

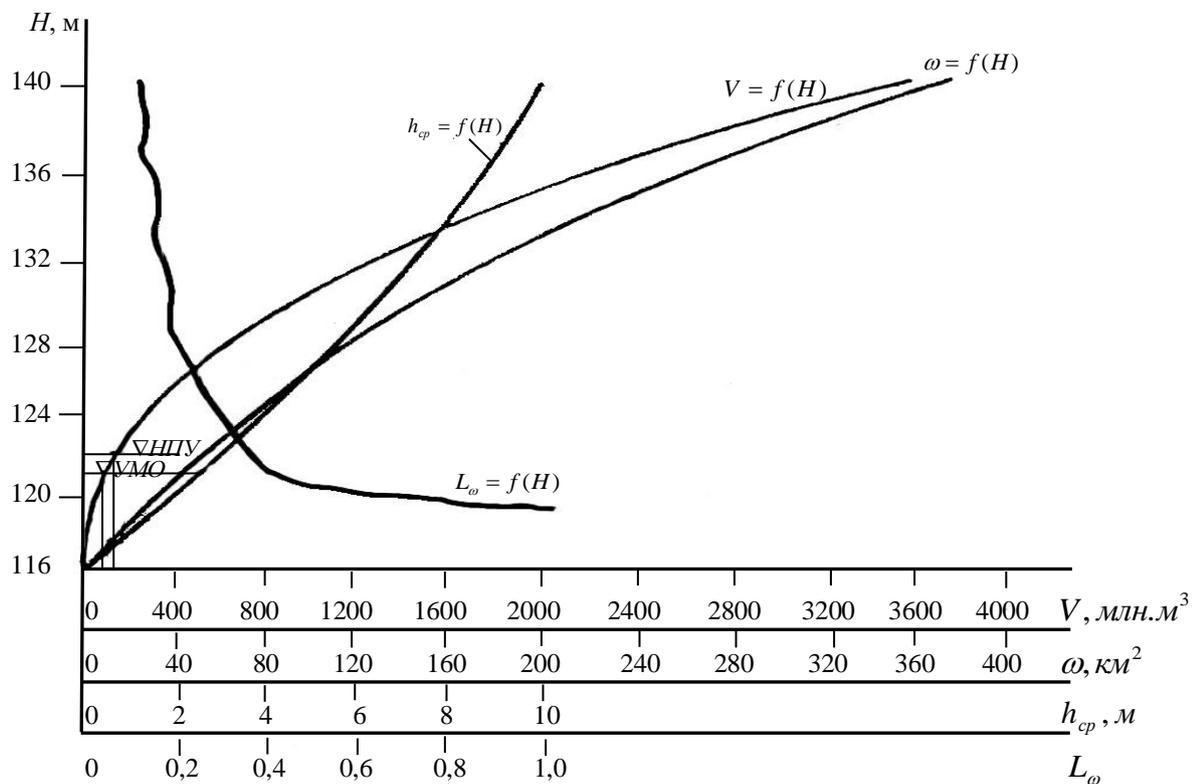


Рис. 1.2. Батиграфическая характеристика водохранилища

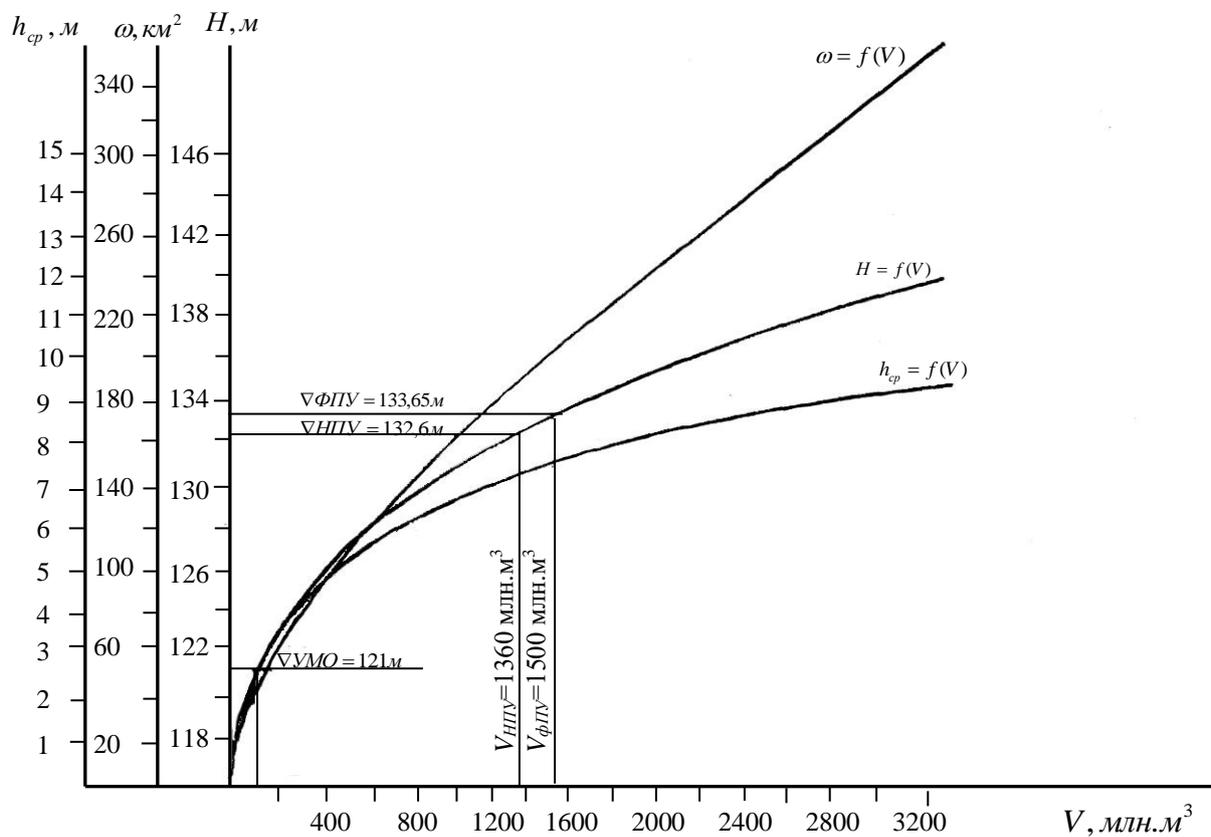


Рис. 1.3. Объёмная характеристика водохранилища

2. Определение мертвого объема и срока службы водохранилища

Мертвый объем водохранилища V_{mo} - объем воды, расположенный ниже уровня наибольшего возможного опорожнения водохранилища и необходимый для его нормальной эксплуатации. При его расчете учитывают следующие условия: заиление водохранилища наносами, санитарно-технические требования, обеспечение необходимого качества воды, условия для судоходства, рыбного хозяйства, мелиорации, гидроэнергетики и др. Уровень поверхности воды, ограничивающий этот объем сверху, называют уровнем мертвого объема (*УМО*).

При определении мертвого объема (исходя только из санитарно-технических условий) для обеспечения нормального качества воды нормами проектирования принимают два условия: средняя глубина воды в водохранилище при минимальном его наполнении должна быть $h_{cp} \geq 2,5$ м; критерий литорали (мелководья) $L_{\omega} \leq 0,35$.

Пользуясь кривой $h_{cp} = f(H)$ (рис. 2.2), при $h_{cp} = 2,5$ м получаем $УМО = 121$ м. Этому уровню соответствует (по кривой $V = f(H)$) $V_{MO} = 100$ млн. м³.

По найденному объему, используя кривую $L_{\omega} = f(H)$, устанавливают критерий литорали L_{ω} . Он равен 0,39 (рис. 2.2).

Так как L_{ω} получился больше допустимого, значит $УМО = 121$ м не может быть принят в качестве уровня мертвого объема. В данной ситуации необходимо либо запроектировать обвалование берегов водохранилища и снизить критерий литорали до 0,35, либо предварительно принять за уровень мертвого объема тот уровень, при котором $L_{\omega} = 0,35$ и утвердить его окончательно в том случае, если срок службы водохранилища будет соответствовать нормативам. В рассматриваемом примере остановимся на принятом $УМО = 121$ м и назначим обвалование водохранилища.

Найденный мертвый объем проверяют на условие заиления его наносами. Время заиления мертвого объема (срок службы водохранилища) устанавливают по выражению:

$$T = V_{MO} / W_T, \quad (2.1)$$

где W_T - среднегодовой объем отложений наносов в водохранилище, м³.

$$W_T = [(10^{-6} \rho_0 W_0) / \gamma_{отл}] (1 + m - \delta), \quad (2.2)$$

где ρ_0 - норма годовой мутности во входном створе водохранилища, г/м³; W_0 - норма годового стока, м³; $\gamma_{отл}$ - объёмная масса донных отложений, т/м³; δ - транзитная часть наносов, сбрасываемых из водохранилища в нижний бьеф; m - количество донных наносов в % от взвешенных.

Допуская, что транзитная часть наносов, сбрасываемых из водохранилища в нижний бьеф, составляет до 30 %, а количество донных наносов 10 % от объема взвешенных наносов, W_T за год будет равен:

$$W_T = [(10^{-6} \cdot 600 \cdot 1224 \cdot 10^6) / 0,8] (1 + 0,1 - 0,3) = 0,734 \text{ млн. м}^3$$

Следовательно, время заиления мертвого объема:

$$T = 100 \cdot 10^6 / 0,734 \cdot 10^6 = 136 \text{ лет.}$$

Допустимый срок заиления для малых водохранилищ – 50 лет. В данном примере время заиления значительно больше 50 лет. Поэтому оставляем принятый $УМО = 121$ м и $V_{МО} = 100$ млн. м³.

3. Расчет потерь воды из водохранилища

Потери воды из водохранилища в основном складываются из потерь на фильтрацию через ложе водохранилища Φ и дополнительное испарение E_d , мм:

$$h_{\text{пот}} = \Phi + E_d \quad (3.1)$$

Особенно большие потери воды на фильтрацию наблюдаются в первые годы после сооружения водохранилищ, после их наполнения, когда происходит напитывание грунтов, слагающих ложе водохранилища.

В дальнейшем фильтрация уменьшается в связи с уменьшением коэффициента фильтрации вследствие кольяматации (заиливание пор).

При расчетах потери на фильтрацию принимают в виде слоя воды, теряемой с зеркала водохранилища или пруда за месяц или год.

Суммарные потери на фильтрацию из водохранилища С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель и М.В. Потапов рекомендуют определять приблизительно в зависимости от трех градаций:

- для хороших гидрогеологических условий слой потерь принимают равным 0,36 м/год, или 30 мм/месяц;

- для средних гидрогеологических условий – 0,72 м/год, или 60 мм/месяц;

- для плохих гидрогеологических условий – 1,08 м/год, или 90 мм/месяц.

Потери воды на дополнительное испарение определяют:

$$E_d = E_e - E_c \quad (3.2)$$

где E_e - средний многолетний слой испарения с водной поверхности, мм;
 E_c - средний многолетний слой испарения с поверхности суши, затапливаемой водохранилищем, мм (рис. 3.1).

Средний многолетний слой испарения с водной поверхности \bar{E}_e за безледоставный период находят по следующему выражению:

$$\bar{E}_e = E_{20} \cdot K_H \cdot K_3 \cdot K_\omega, \quad (3.3)$$

где E_{20} - норма испарения с водной поверхности эталонного бассейна 20 м², мм (рис. 3.2); K_H - поправочный коэффициент на глубину, который определяют в зависимости от средней глубины водохранилища h_{cp} и природной

зоны (табл. 3.1); K_3 - поправочный коэффициент на защищенность водоема от ветра древесной растительностью и другими препятствиями, его определяют в зависимости от соотношения средней высоты препятствий h_3 , м, к средней длине разгона воздушного потока L_{cp} , м:

h_3/L_{cp}	0 - 0,01	0,03	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
K_3	0,96	0,89	0,84	0,8	0,76	0,7	0,64	0,57	0,51

K_ω - поправочный коэффициент на площадь водоема для тундровых и северных районов, лесных и лесостепных зон, его находят по табл. 3.2, для остальных зон $K_\omega = 1$.

Таблица 3.1 Поправочный коэффициент на глубину водоема K_n

Зона водоема	Средняя глубина водоема h_{cp} , м					
	2	5	10	15	20	25
Лесная зона	1,00	0,99	0,97	0,95	0,94	0,92
Лесостепная зона	1,00	0,98	0,96	0,95	0,94	0,92
Степная зона	1,00	0,96	0,95	0,94	0,93	0,93
Зона полупустынь	1,00	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97
Зона пустынь	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Таблица 3.2 Поправочный коэффициент на площадь водоема K_ω

Площадь водоема, ω , км ²	0,00002	0,01	0,05	0,10	0,50	1,0	2,0	5,0	200
Коэффициент K_ω	1,00	1,03	1,08	1,11	1,18	1,21	1,23	1,26	1,00

По карте районирования России по типу внутригодового хода испарения (см. рис. 3.2) определяют, к какой зоне относится проектируемое водохранилище. Затем согласно установленной зоне, находят внутригодовое распределение годового испарения по месяцам (табл. 3.3).

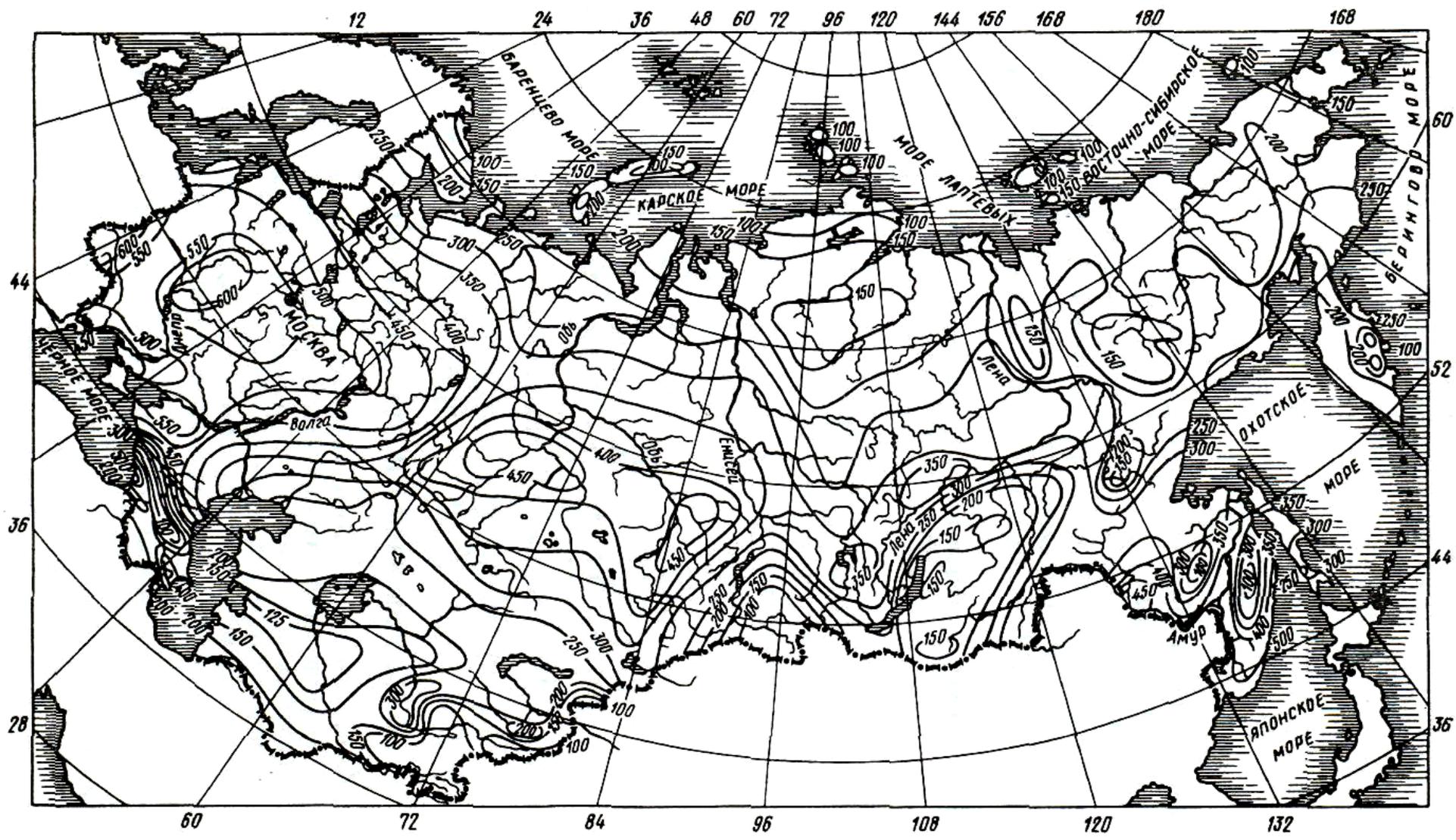


Рис. 3.1. Карта среднемноголетнего годового слоя испарения с поверхности суши E_c , мм

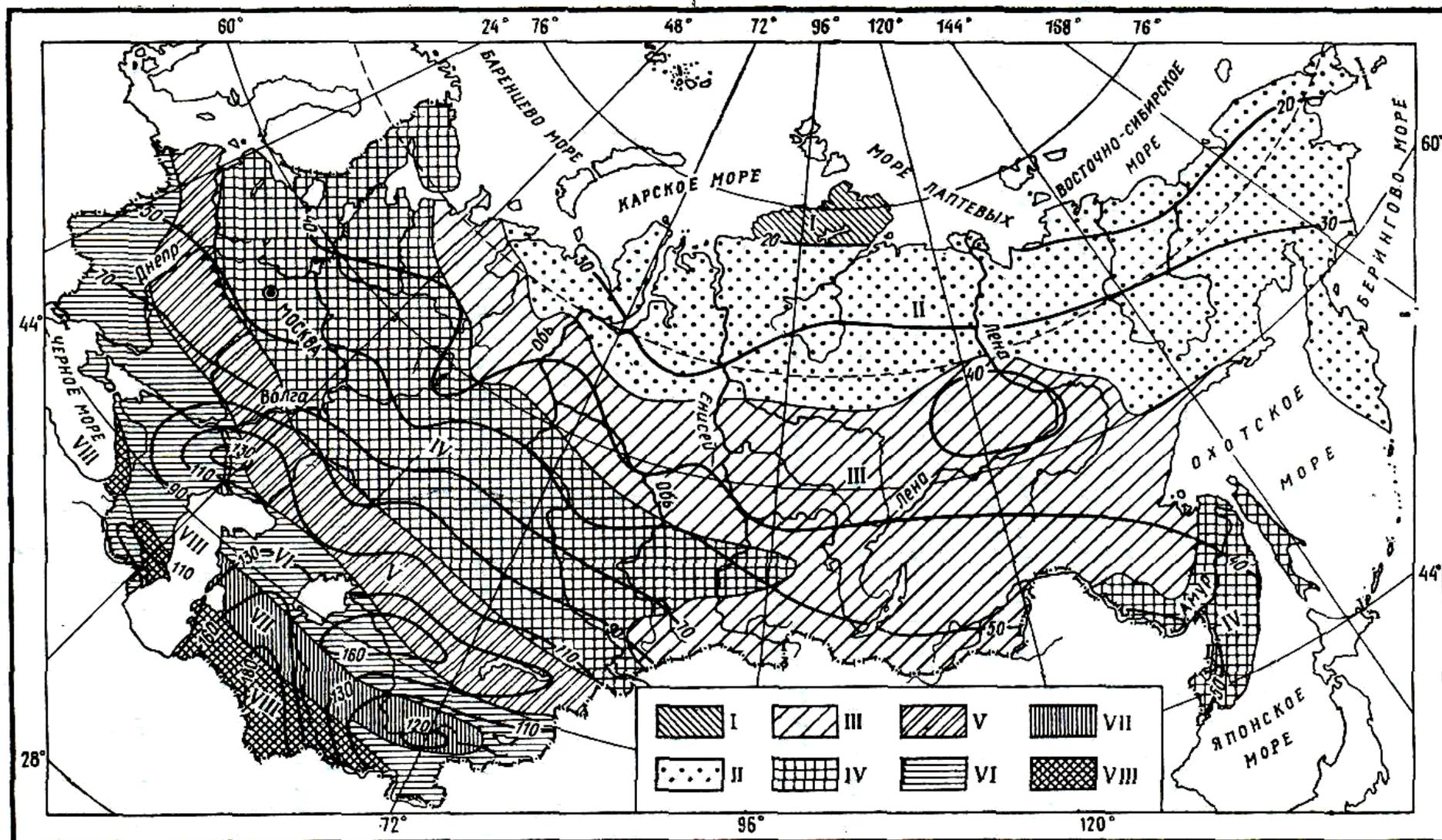


Рис. 3.2. Карта среднемноголетнего годового испарения с эталонного бассейна площадью 20 м², см

Таблица 3.3. Испарение с поверхности малых водоемов по месяцам, % от годовой суммы за безледоставный период

Зоны	Месяцы											
	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

При проектировании сезонного регулирования стока в качестве расчетной величины потерь на испарение принимают слой дополнительных потерь на испарение расчетной обеспеченности. Расчетная обеспеченность испарения P_e равна:

$$P_e = 100 - P_x, \quad (3.4)$$

где P_x - обеспеченность осадков.

Расчетный слой дополнительных потерь на испарение за каждый месяц безледоставного периода E_d находят приближенно по формуле

$$E_d = \overline{E}_e K_{pe} - \overline{X} K_{px}, \quad (3.5)$$

где \overline{E}_e - средний месячный слой испарения с водной поверхности, мм; \overline{X} - средний месячный слой осадков, мм (принимается по данным метеостанций); K_{pe} - модульный коэффициент слоя испарения с водной поверхности (принимается по табл. 3.4, в зависимости от P_e и коэффициента вариации испарения C_{Ve}); K_{px} - модульный коэффициент слоя осадков заданной обеспеченности (определяют по таблице ординат трехпараметрического гамма-распределения в зависимости от P_x и коэффициента вариации осадков C_{Vx} (см. приложение 1). При этом коэффициент асимметрии принимается $C_s = 2C_V$.

Таблица 3.4. Ординаты аналитической кривой обеспеченности годового испарения в зависимости от зоны и вероятности превышения P_e

Зона	C_{Ve}	Вероятность превышения P_e , %					
		1	3	5	10	25	50
I...V	0,15	1,35	1,28	1,25	1,19	1,1	1
VI...VIII	0,1	1,23	1,19	1,16	1,13	1,07	1

Расчет суммарного слоя потерь воды из водохранилища удобно выполнять в табличной форме (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Вычисление потерь из водохранилища в мм слоя
(При заданных $C_{vx} = 0,23$; $C_{ve} = 0,1$; $P_x = 90\%$; $P_e = 100 - P_x = 10\%$)

Месяцы	Фильтрация Φ , мм	Испарение			Осадки		Доп. Испарение, E_d , мм	Итого потерь $h_{ном}$, мм
		E_e , %	\bar{E}_e , мм	$\bar{E}_e K_{pe}$	\bar{X}	$\bar{X} K_{px}$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	30	-	-	-	49	35	-	30
II	30	-	-	-	43	31	-	30
III	30	3	22	25	39	28	-	30
IV	30	6	45	51	34	24	27	57
V	30	13	98	110	46	33	77	107
VI	30	17	128	143	78	56	87	117
VII	30	20	450	169	50	36	133	163
VIII	30	19	142	160	44	32	128	158
IX	30	13	98	110	41	30	80	110
X	30	7	52	59	50	36	23	110
XI	30	2	15	17	45	32	-	30
XII	30	-	-	-	47	34	-	30
Год	360	100	750*	-	536	386	-	30

Примечание: 750* - получено по формуле 2.10. В гр. 4 величины \bar{E}_e в каждом месяце вычисляют по пропорции (например, для III месяца $\bar{E}_e = 3 \cdot 750 / 100 = 22$)

Суммарный объем потерь из водохранилища находят следующим образом:

$$W_{ном} = 0,001 h_{ном} \cdot \omega, \quad (3.6)$$

где $h_{ном}$ - слой суммарных потерь воды, мм; ω - площадь зеркала водохранилища. Принимая $\omega = 100 \text{ км}^2$, строят график суммарных потерь воды из водохранилища (рис. 3.3).

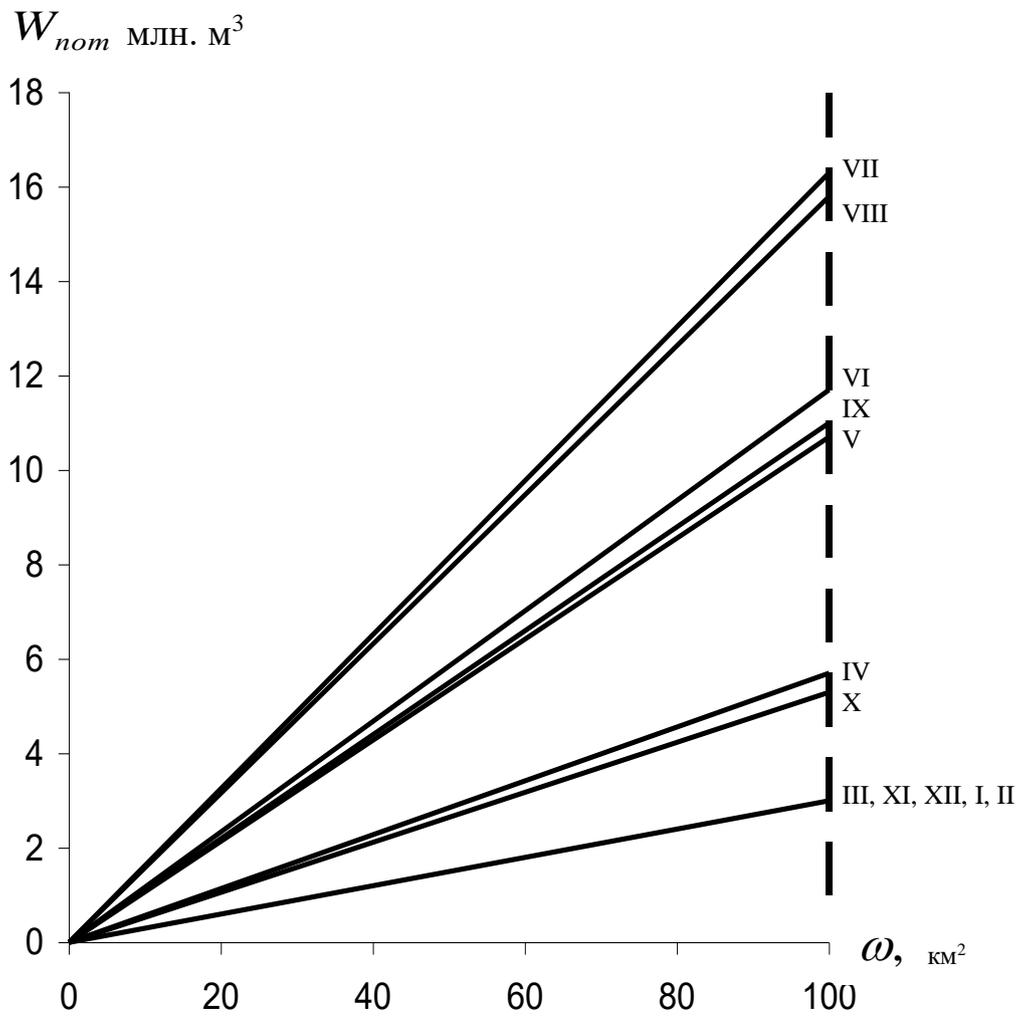


Рис. 3.3. График суммарных потерь воды из водохранилища

4. Водохозяйственный расчет водохранилища сезонного регулирования стока

Под водохозяйственным расчетом водохранилища понимают совокупность расчетов по установлению основных параметров водохранилища, в частности полезного $V_{ПЛЗ}$ и полного $V_{НПУ}$ объемов и соответствующих им уровней воды.

Полезный объем $V_{ПЛЗ}$ – основная рабочая часть объема водохранилища, предназначенная для регулирования стока. Он зависит от назначения водохранилища, вида регулирования стока; определяют его водохозяйственным расчетом.

Полный объем водохранилища соответствует отметке НПУ (см. рис. 1.1 б) – наивысшему проектному уровню верхнего бьефа, который поддерживают в нормальных условиях эксплуатации гидроузла:

$$V_{НПУ} = V_{МО} + V_{ПЛЗ} \quad (4.1)$$

Методы водохозяйственных расчетов водохранилищ разделяют на балансовые (основанные на использовании длительных наблюдений за стоком) и обобщенные (опирающиеся на математическую статистику и теорию вероятностей).

Водохозяйственный расчет водохранилища сезонного регулирования стока обобщенным методом применительно к многолетнему регулированию стока – п. 2.5.

Сезонное (годовое) регулирование стока обусловлено неравномерностью внутригодового распределения стока и несовпадением режимов естественного стока и водопотребления. Годовой объем водопотребления при сезонном регулировании не должен превышать объем стока расчетного (маловодного) водохозяйственного года.

На результаты сезонно-годового регулирования при постоянной отдаче сток предыдущих лет не оказывает влияния, цикл регулирования ограничивается годом.

Сезонно-годовое регулирование можно рассчитывать по характерным годам различной обеспеченности, соответствующей группам водности без учета их хронологической последовательности, или путем сопоставления гидрографа стока заданной обеспеченности с плановой отдачей.

В этом случае находят полезную емкость водохранилища при заданном притоке, плановой отдаче, нормах потерь воды и начальном наполнении, т.е. решают прямую задачу.

Полезная емкость должна обеспечивать стопроцентную бесперебойность отдачи за период регулирования. Избытки стока над потреблением сбрасываются в нижний бьеф и называются холостыми сбросами.

Период, в течение которого происходит заполнение емкости и увеличение объемов наполнения, называют периодом накопления. Сработка соответствует периодам частичного или полного опорожнения водохранилища.

Для уяснения методики расчета на одном рисунке совмещают гидрографы стока Q и отдачи q в единых масштабах объемов и времени (рис. 4.1).

За время от t_2 до t_3 расходы отдачи превышают приток. Заштрихованная площадь равна объему воды, достаточному для поддержания заданной отдачи, или дефициту стока, который обозначают через Δd_1 .

За время от t_1 до t_2 заштрихованная площадь, измеренная с учетом масштабов времени и расходов, дает избыточный объем воды над заданным расходом отдачи. Избыток стока обозначают как Δb_1 .

Для перераспределения стока необходимо на заданный расход отдачи иметь превышение объема (избытка) стока над дефицитом: $\Delta b_1 > \Delta d_1$.

Чередование периода накопления воды и последующей обработки называют тактом работы водохранилища. На рис. 4.1 приведен пример одноктактной работы водохранилища.

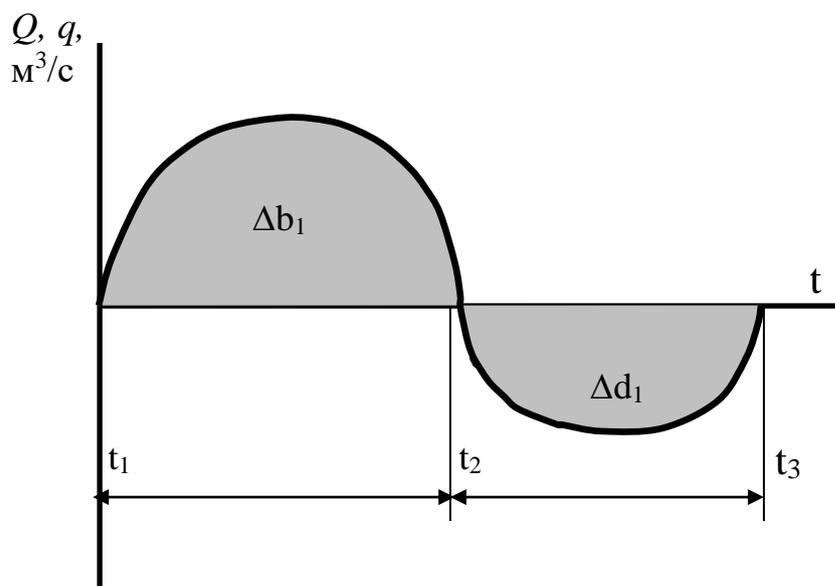


Рис. 4.1. Гидрограф стока и отдачи

Если работа водохранилища состоит из двух периодов накопления и последующих за каждым из них периодов сброски, то имеет место двухтактный режим. При двухтактной работе накопление воды и опорожнение водохранилища зависят от соотношения между избытками и последующими за ними дефицитами стока.

В случае, если каждый избыток больше последующего за ними дефицита, т.е. $\Delta b_1 > \Delta d_1$; $\Delta b_2 > \Delta d_2$, весь расчетный период регулирования делится на два независимых друг от друга цикла регулирования и имеет место двухтактный режим работы водохранилища с **независимым циклом** (рис.4.2).

Полезный объем $V_{\text{плз}}$ в этом случае равен наибольшему дефициту:

$$V_{\text{плз}} = \Delta d_{\text{наиб}}, \quad (4.2)$$

а начало водохозяйственного года совпадает с концом периода наибольшего дефицита.

Если соотношение между избытками и последующими за ними дефицитами при двухтактной работе водохранилища выражается неравенством: $\Delta b_1 > \Delta d_1$, $\Delta b_2 < \Delta d_2$, но $\Delta b_2 < \Delta d_1$, то

$$V_{\text{плз}} = (\Delta d_1 + \Delta d_2) - \Delta b_2, \quad (4.3)$$

т.е. полезный объем равен сумме дефицитов минус второй избыток. Это и есть двухтактная работа водохранилища с **зависимым циклом** (см. рис.4.2). Начало водохозяйственного года совпадает с концом второго дефицита.

Если $\Delta b_1 > \Delta d_1$; $\Delta b_2 < \Delta d_2$, но $\Delta b_2 > \Delta d_1$, то

$$V_{\text{плз}} = \Delta d_{\text{макс}} \quad (4.4)$$

В данном примере $V_{\text{плз}} = \Delta d_2$, т.е. полезную емкость определяют объемом наибольшего дефицита, а данный режим работы называют **промежуточно-зависимым** (рис. 4.2). Начало водохозяйственного года совпадает с концом наибольшего дефицита.

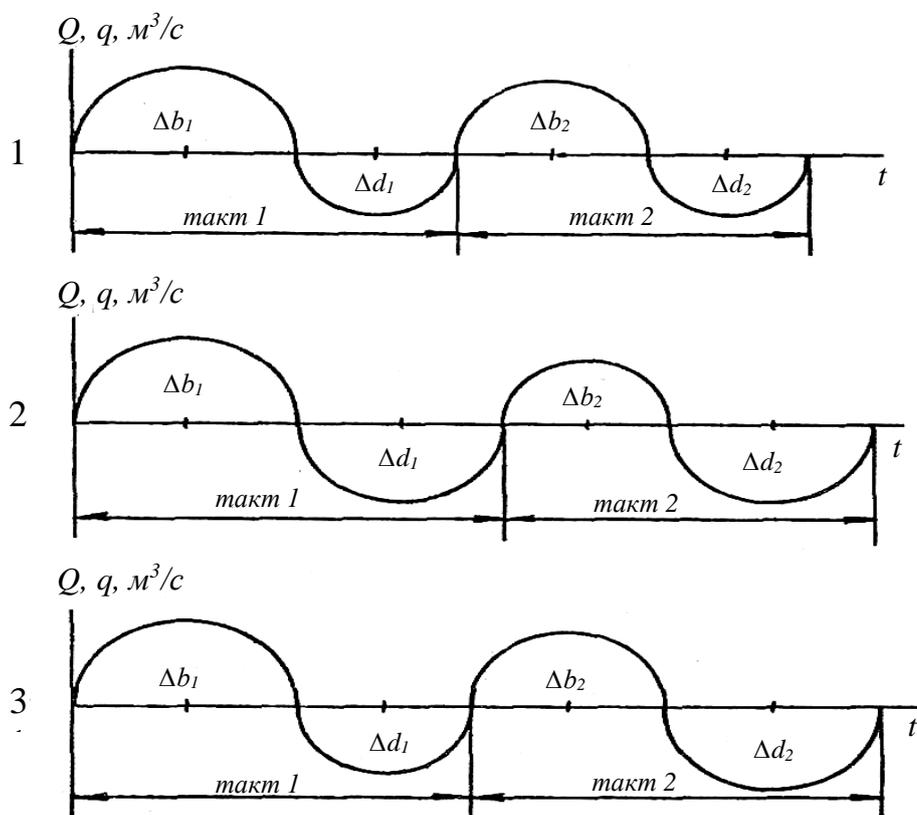


Рис. 4.2. Двухтактный режим работы водохранилища: 1 - независимый цикл; 2 - зависимый; 3 – промежуточнозависимый.

Балансовые расчеты водохранилищ таблично-цифровым способом широко распространены в практике водохозяйственного проектирования. Расчеты обычно выполняют в табличной форме. Для большей наглядности таблично-цифровые расчеты иллюстрируют графиками, характеризующими основные результаты работы.

Имея заданные месячные расходы притока Q и потребления q определяем расчетный объем стока за месяц W_p и расчетный объем отдачи U_p , умножая Q и q на число секунд в принятом интервале.

Для упрощения расчетов длительность каждого месяца в году принимают одинаковой, равной 30,44 суток, чему соответствует 2,63 млн. секунд.

Для сопоставления расчетного стока и плановой отдачи по месяцам и за год полученные значения сводят в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Расчет данных для балансового расчета водохранилища сезонного регулирования стока

Месяцы	W , млн. м ³	U , млн. м ³	Разность притока и отдачи
I	25	40	-15
II	25	40	-15
III	25	40	-15
IV	200	65	135
V	170	65	105
VI	40	65	-15
VII	40	65	-15
VIII	40	65	-15
IX	100	65	35
X	100	40	60
XI	25	40	-15
XII	25	40	-15
Год	815	630	185

Анализ данных табл. 4.1, говорит о том, что заданная отдача может быть обеспечена только лишь в результате регулирования стока, потому что с I по III и с VI по VIII, XI, XII месяцы приток меньше плановой отдачи. А сопоставление годового стока с плановой отдачей за год показывает, что достаточно произвести сезонно-годовое регулирование стока, так как $W_{p.g} = 815$ млн. м³ больше $U_{p.g} = 630$ млн. м³.

Таблично-цифровые балансовые расчеты водохранилища сезонного регулирования удобно вести в табличной форме (табл. 4.2).

Расчет производят в два этапа: предварительный - без учета потерь воды на испарение и фильтрацию и окончательный - с учетом данных потерь.

В графу 1 табл. 4.2 выписывают месяцы водохозяйственного года (в нашем примере он начинается с IV месяца, т.е. с первой положительной разницы стока W и отдачи U (см. табл. 4.1)), в графы 2, 3, соответственно, расчетный сток и плановую отдачу. Вычитая из суммарного притока суммарное потребление в каждом месяце получим избытки в графе 4 ($W_p - U$, со знаком плюс), в графе 5 - недостатки (дефициты) ($W_p - U$, со знаком минус).

Полученные в календарной последовательности величины избытков и недостатков суммируют (получают Δb и Δd). Анализ чередования сумм избытков и недостатков указывает на случай двухтактной работы водохранилища с независимым циклом:

$$V_{плз} = d_{макс} = 75 \text{ млн. м}^3;$$

$$V_{НПУ} = V_{мо} + V_{плз} = 100 + 75 = 175 \text{ млн. м}^3.$$

По найденному полному объему определяют отметку $НПУ$ на батиграфической кривой (рис. 1.2) она соответствует: $\nabla НПУ = 122 \text{ м}$.

Затем выполняется расчет наполнения водохранилища V_i на начало и конец каждого месяца, а также сбросов излишков воды S .

Порядок наполнения водохранилища определяется правилами регулирования. Рассматриваются два предельных варианта правил регулирования.

По **первому варианту** правил водохранилище наполняют до $V_{НПУ}$ за счет первых избытков и только после этого излишки воды сбрасывают через водосбросное сооружение.

В гр. 6 табл. 4.2 произведен расчет конечных наполнений по первому варианту регулирования. Начинается расчет с момента опорожнения водохранилища до $V_{мо}$ и ведется вперед по ходу времени в году путем последовательного прибавления избытков и вычитания недостатков.

Таблица 4.2. Расчет водохранилища с зонного регулирования (объемы стока, отдач, потерь и наполнений, млн. м³)

$$V_{ПЛЗ} = 75 \text{ млн. м}^3; V_{МО} = 100 \text{ млн. м}^3; V_{НИУ} = 175 \text{ млн. м}^3$$

Месяцы	Расчётный сток W_p	Плановая отдача U_p	Наполнение без учёта потерь млн. м ³						Расчёт потерь			Наполн. с учётом потерь				
			$W_p - U_p$		первый вариант		второй вариант		ср. объём V_{cp}	ср. площадь зеркала ω_{cp}	итого потеря V_{II}	сток минус отдача и потери		первый (второй) варианты		
			+	-	V_K	сброс S	V_K	сброс S				+	-	V_K	сброс S	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
					100		100							106		
IV	200	65	135			60		135	138	48	4	131			41	
V	170	65	105		175	105	100	30	175	53	6	99		196	99	
VI	40	65	$\Delta b_1 =$ 240	25	175		175		162	51	6	$\Delta b_1 =$ 230	31			
VII	40	65		25	150		150		138	48	8		33		165	
VIII	40	65		25	125		125		112	43	7		32		132	
IX	100	65	35	$\Delta d_1 = 75$	[100]		[100]	20	108	42	5	30	$\Delta d_1 =$ 96		[100]	
X	100	40	60		135		115	20	145	49	3	57			130	
XI	25	40	$\Delta b_2 =$ 95	15	175		175		168	50	2	$\Delta b_2 =$ 87	17		187	
XII	25	40		15	160		160		152	49	1		16		170	
I	25	40		15	145		145		138	48	1		16		154	
II	25	40		15	130		130		122	44	1		16		138	
III	25	40		15	115		115		108	42	1		16		122	
					100		100						16	106		
$\Sigma W = 815$ $\Sigma U = 630$			$\Delta d_2 = 75$		$\Sigma S = 185$		$\Sigma S = 185$		$\Sigma V_{II} = 45$			$\Delta d_2 = 81$		$\Sigma S = 140$		

В данном примере, $\Delta d_1 = \Delta d_2$ поэтому начало расчета может совпадать как с концом первого дефицита, так и с концом второго дефицита. Здесь расчет начат после первого дефицита (мертвый объем обведен в квадратную скобку [100]). Наиболее часто встречаются случаи с независимым циклом, когда дефициты не равны. В этом случае расчет начинают после наибольшего из дефицитов.

Если при последовательном суммировании будет получена цифра, превышающая величину полного объема, то в конце этого месяца в гр. 6 записывают величину полного объема $V_{НПУ}$, а избыток, который составит величину сброса S , заносят в гр. 7. В рассматриваемом примере сумма избытков за IV месяц имеет конечный объем больше, чем необходимый полный объем (175 млн. м³) водохранилища. Поэтому на заполнение водохранилища пойдет 75 млн. м³, а 60 млн. м³ составят сброс.

В 5 месяце весь избыток составит сброс, ибо водохранилище наполнено до *НПУ*. В результате расчетов по всем интервалам года будет получен нулевой запас $V_{мо}$. Второй критерий правильности выполненных расчетов - равенство суммарной величины сброса $\sum S$ (гр. 7) разности между суммарным годовым притоком $\sum W_p$ (гр. 2) и суммарным потреблением $\sum U_p$ (гр. 3):

$$\sum S = \sum W_p - \sum U_p \quad (4.4)$$

Этот вариант наиболее надежен и его применение выгодно по условиям поддержания напора, однако при работе по первому варианту водохранилище быстрее заилеется, потери воды из него увеличиваются и производство гидравлических промывок и ремонтных работ усложняется.

Сущность **второго варианта** регулирования заключается в том, что наполнение водохранилища оттягивается на возможно более поздний срок и в любой момент времени в водохранилище сохраняется минимально необходимые запасы воды. В этом случае вначале производят холостые сбросы при уровне $V_{мо}$, а затем - заполнение водохранилища до *НПУ*.

Расчет по второму варианту регулирования ведут против хода времени в году начиная с момента окончания максимального из дефицитов путем последовательного прибавления к каждому предыдущему объему недостатка и

вычитания избытка, начиная с последнего месяца водохозяйственного года (гр. 8, табл. 4.2).

При таком расчете автоматически один раз будет получена величина, равная полному объему водохранилища, которая при дальнейшем расчете начнет уменьшаться. Когда величина наполнения станет отрицательной или меньше величины $V_{мо}$, в гр. 8 записывают конечное наполнение $V_k = V_{мо}$, а разность между мертвым объемом и фактически полученным $V_{мо} - V_{ф} = S$ составит сброс, как это имеет место в нашем примере по V месяцу. Из автоматически полученной в результате расчета величины $V_{полн} = 175$ млн. м³ вычитают избыток V месяца, равный 105. Отсюда разность равна 70, что меньше величины $V_{мо} = 100$ млн. м³. По правилу расчета в графу V_k записывают $V_{мо} = 100$, а разность $V_{мо} - V_n = 100 - 70 = 30$ млн. м³ составит сброс (гр. 9).

Если величина наполнения согласно расчету станет отрицательной (в примере в IV месяце: $V_k - V_{мо} = 100 - 135 = -35$ млн. м³), то в гр. 8 записываем $V_k = V_{мо}$, а сброс (гр.9) составит $V_{мо} - V_n = 100 - (-35) = 135$ млн. м³.

Если при таком расчете величина $V_{НПУ}$ автоматически получается один раз, то величины $V_{мо}$ могут встретиться несколько раз.

Контролем вычислений служит выражение $\sum W_{PG} - \sum U_{PG} = \sum S$.

Этот вариант предусматривает мощные водовыпуски, способные пропустить большие расходы воды на подъеме половодья. Однако потери воды существенно уменьшаются.

Расчет водохранилища сезонного регулирования с учетом потерь

Второй этап расчета включает определение потерь воды из водохранилища. В работе этот расчет ограничивают первым приближением и проводят применительно к первому варианту регулирования (гр. 10-16).

В гр. 10 определяют средние наполнения водохранилища $V_{ср}$ по интервалам времени как

$$V_{ср} = (V_n + V_k) / 2, \quad (4.5)$$

где V_n и V_k - объемы водохранилища на начало и конец месяца (по данным гр. 6).

Среднюю площадь зеркала ω_{cp} - (гр. 11) находят по объёмной характеристике (рис. 1.3) в зависимости от среднего объема. Затем по графику потерь (рис. 1.6) определяют объемы потерь воды на фильтрацию и испарение: $W_{nom} = f(\omega)$ (гр. 12). Наполнение с учётом потерь определяют как разность расчетного стока, требуемой отдачи и потерь с учетом знака, и записывают в гр. 13 и 14 (из избытков потери вычитают, а к дефицитам – прибавляют). В результате полученного сочетания избытков и недостатков выявляют цикл (может поменяться при учете потерь) и находят полезный объем водохранилища с учетом потерь: $V_{низ} = d_{макс} = d_1 = 96$ млн. м³. В нашем случае цикл остался не зависимым.

Дальнейший расчет конечных наполнений и сбросов ведут по ранее изложенным вариантам регулирования (первому или второму).

Проверка правильности вычислений: разность итогов по гр. 2, 3 и 12 должна быть равна $\sum S$ гр. 16.:

$$\sum S = \sum W_{pг} - \sum U_{pг} - \sum V_{п}, \quad (4.6)$$

где $\sum V_{п}$ – сумма потерь воды из водохранилища на испарение и фильтрацию, млн. м³.

Таким образом, $\sum S = 140 = 815 - 630 - 45$.

Графики, иллюстрирующие результаты расчетов, строят в системе прямоугольных координат. Построение совмещенных графиков разностей стока и отдачи наполнений водохранилища и сбросов по первому (с учетом потерь) и второму (без учета потерь) вариантам регулирования показаны на рис. 4.3.

На одной из осей ординат откладывают разности стока и отдачи ($W_p - U_p$), а на другой конечные наполнения по интервалам времени V_K . Линию отдачи принимают за нулевое наполнение или мертвый объем. Положительные разности соответствуют избыткам, а отрицательные - дефицитам отдачи (табл. 4.2 гр. 13, 14 для первого варианта и гр. 4, 5 для второго варианта). От линии нулевого наполнения вверх по шкале откладывают полезный объем и проводят горизонтальную линию - линию полного объема водохранилища $V_{нпв}$. Далее,

начиная от нуля, по концам интервалов (месяцев) наносят график конечных наполнений (гр. 15 по первому варианту и гр. 8 по второму варианту). Конечные наполнения изменяются в пределах от мертвого объема до объема при $HПУ$ и находятся между двумя параллельными прямыми. Избытки, идущие на сброс, заштриховывают соответственно величине, полученной в расчете (гр. 16 – первый вариант, гр. 9 – второй вариант).

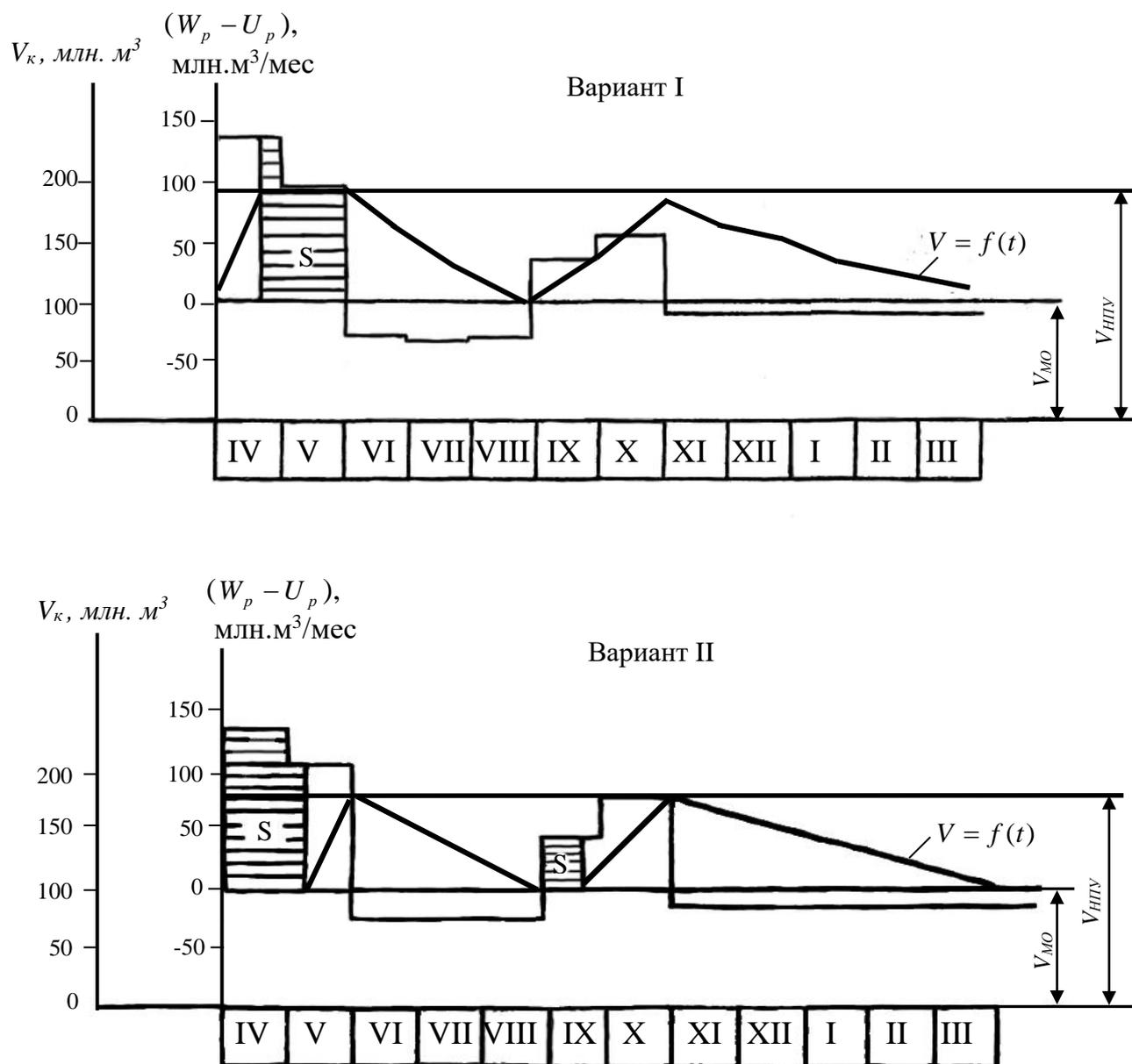


Рис. 4.3. Совмещенные графики разностей стока и отдачи, наполнений водохранилища и сбросов
(первый вариант правил регулирования - с учетом потерь воды;
второй вариант правил регулирования - без учета потерь воды)

Совмещенные графики разностей стока и отдачи, наполнений водохранилища и сбросов позволяют установить конечные объемы водохранилища на любой, интересующий нас момент времени.

5. Расчет водохранилища сезонного регулирования стока без учета потерь воды графическими способами

Графические способы расчета водохранилища используют в основном для предварительных и вспомогательных расчетов, а также для анализа особо сложных случаев регулирования стока. Они отличаются наглядностью, позволяют лучше понять сущность и процесс регулирования стока.

При графических расчетах водохранилищ применяют интегральные (суммарные) кривые – изображение в хронологической последовательности возрастания стока, отдачи или их разности в суммарном виде.

Метод интегральных кривых широко применяют в расчетах регулирования стока. Интегральные кривые наглядно показывают процесс притока воды в водохранилище и забор воды на полезную отдачу: можно таким образом установить результат регулирования стока на любой момент рассматриваемого периода.

Для построения интегральных кривых составляют вспомогательную таблицу вычисления координат или данных для построения суммарных кривых стока и отдачи (см. табл. 5.1). Расчет таблицы начинают с водохозяйственного года (в нашем случае это IX месяц).

Таблица 5.1. Данные для построения суммарных кривых стока и отдачи

Месяцы	W_p	U	ΣW_p	ΣU	$K\Sigma U$	$\Sigma W_p - \Sigma U$	$\Sigma W_p - K\Sigma U$	ΣW_{CP}	$\Sigma W_p - \Sigma W_{CP}$	$\Sigma U - \Sigma W_{CP}$	$K\Sigma U - \Sigma W_{CP}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
			0	0	0	0	0	0	0	0	0
IX	100	65	100	65	84	35	16	68	32	-3	15
X	100	40	200	105	136	95	64	136	64	-31	0
XI	25	40	225	145	188	80	37	203	22	-58	-15
XII	25	40	250	185	240	65	10	271	-21	-86	-31
I	25	40	275	225	291	50	-16	339	-64	-114	-48
II	25	40	300	265	343	35	-43	407	-107	-142	-64
III	25	40	325	305	394	20	-69	475	-150	-170	-81
IV	200	65	525	370	478	155	47	543	-18	-173	-65
V	170	65	695	435	562	260	133	611	84	-176	-49
VI	40	65	735	500	647	235	88	679	56	-179	-32

VII	40	65	775	565	730	210	45	747	28	-182	-17
VIII	40	65	815	630	815	185	0	815	0	-185	0

Объем стока за месяц (расчетный) – W_p , объем требуемой отдачи за месяц – U , суммарный объем стока и суммарный объем требуемой отдачи (все показатели в млн. м³) соответственно располагают от начала водохозяйственного года.

Полная интегральная суммарная кривая W , которая характеризует последовательный ход изменений объемов стока во времени, строится по уравнению:

$$W = \int_0^t Q dt, \quad (5.1)$$

а при ступенчатом графике притока

$$W = \sum_0^t Q dt \quad (5.2)$$

Расчет по полной суммарной кривой производят на чертежах (рис. 5.1 и 5.2). По данным граф 1, 4, 5 табл. 5.1 в прямоугольных координатах строят суммарные кривые стока $\sum W = f(t)$ и отдачи $\sum U = f(t)$ и определяют полезную емкость водохранилища, режим наполнений, сработки и холостые сбросы применительно к двум вариантам правил регулирования.

На оси абсцисс откладывают время, на оси ординат - суммарные объемы стока и требуемой отдачи. На любой момент времени ординаты суммарных кривых стока и требуемой отдачи показывают объемы воды за период от начала водохозяйственного года.

При водохозяйственных расчетах по методу интегральных кривых стока и отдачи в прямоугольных координатах следует использовать основные свойства полной суммарной кривой:

-средний расход за отрезок времени находят как тангенс угла наклона секущей, соединяющей точки пересечения суммарной кривой с осью абсцисс;

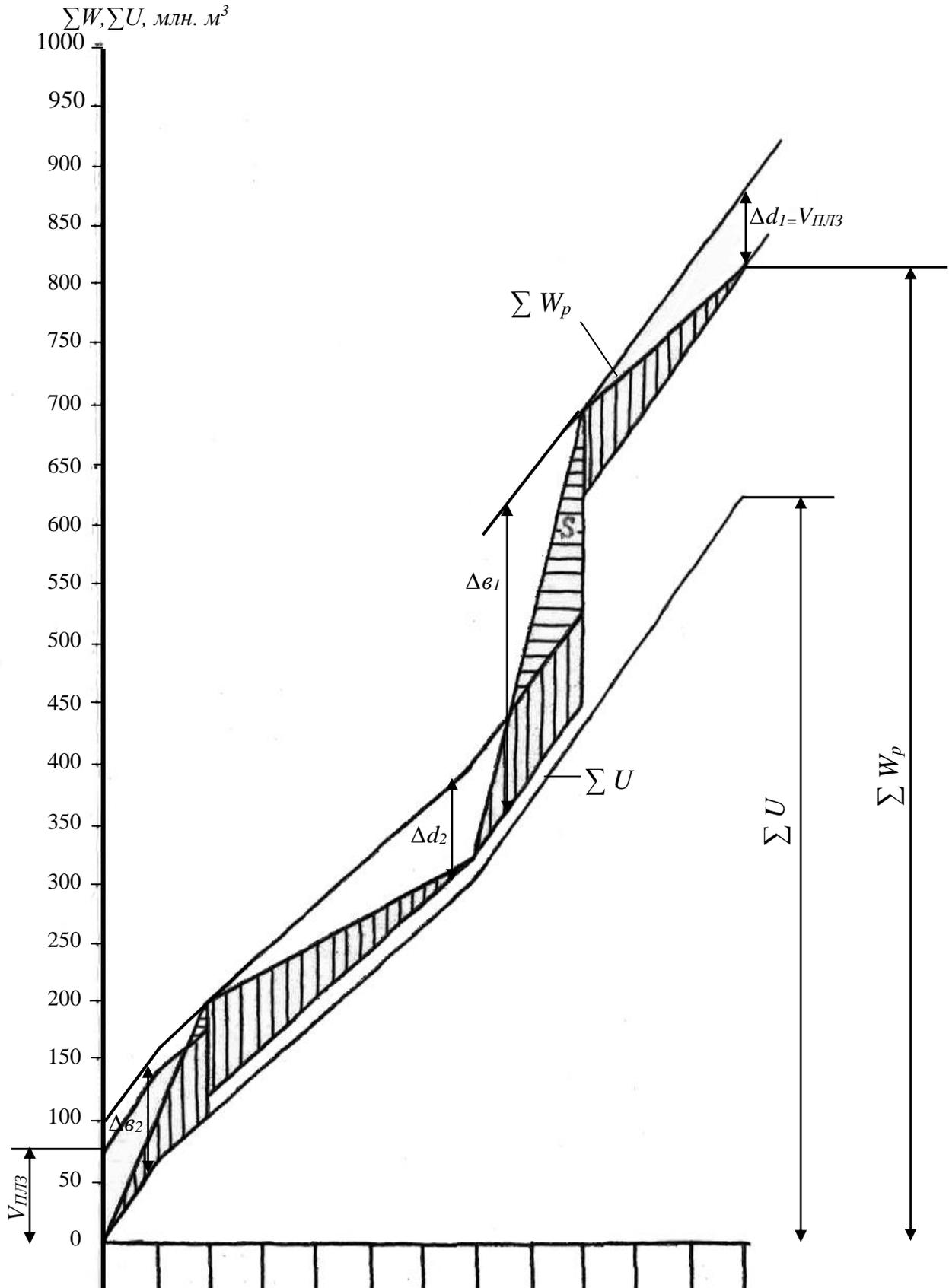
-тангенс угла между осью абсцисс и касательной к суммарной кривой равняется расходу воды в точке касания.

После построения суммарных кривых стока $\sum W = f(t)$ и отдачи $\sum U = f(t)$ осуществляют следующие: суммарную кривую потребления перемещают параллельно самой себе и ищут все возможные точки касания ее с суммарной кривой притока. Число точек касания должно быть четным, одна половина этих точек будет точками нижнего касания, другая - верхнего. Точки касания являются переломными. Так как расходы притока Q в каждой точке касания равны расходам потребления q , а затем правее верхней точки касания Q становятся меньше q , а правее нижней точки больше q , то очевидно, что каждая верхняя точка касания соответствует концу периода избытка и началу периода недостатка. Отрезок времени от точки верхнего касания до точки последующего по ходу времени нижнего касания является периодом дефицита стока. Справа от точки нижнего касания находится зона избыточного стока. Вертикальное расстояние между нижней и последующей верхней касательной равняется объему избытков. По свойству интегральных кривых отрезок ординаты между соответствующей парой верхнего и нижнего касания дает в принятом масштабе величину избытка или дефицита. Число пар касания определяет число тактов в работе водохранилища. Зная число тактов и величину избытков и дефицитов, легко установить их сочетание и определить величину полезного объема.

Полезный объем водохранилища по способу полной суммарной кривой находят как наибольшее из вертикальных расстояний между предыдущими верхними и последующими нижними касательными при условии, что верхняя касательная не пересекает суммарную кривую до точки нижнего касания. Всегда сначала по ходу времени должно быть верхнее касание, а затем нижнее.

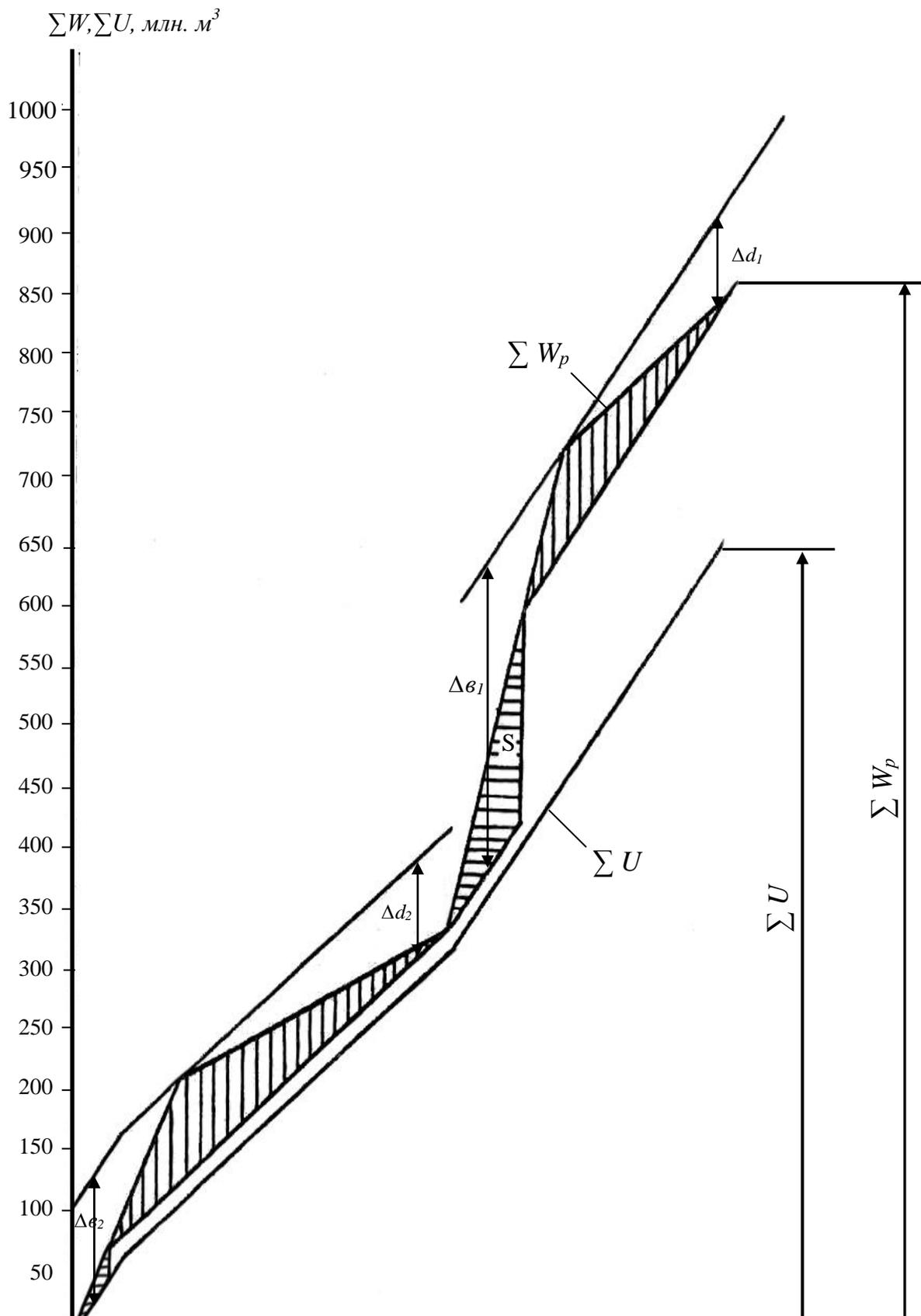
В нашем примере суммарные дефициты, определенные как вертикальное расстояние между касательными, равны между собой и дают величину полезной ёмкости без учета потерь воды: $d_1 = d_2 = V_{нлз}$ млн. м³. По первому варианту регулирования водохранилище заполняется полностью в начальный период избыточного стока. Для этого найденную графическим путем величину $V_{нлз}$ (полезного объема) переносят в начало координат. Дату наполнения водохранилища до *НПУ* на кривой стока находят путем смещения вверх кривой требуемой отдачи в период избыточного стока на величину полезной

емкости. Объем избыточного стока затрачивается на заполнение полезной емкости водохранилища (75 млн м³) и на холостые сбросы (X и IV-V месяцы). На интегральных кривых стока значение холостых сбросов в пределах месячных интервалов времени показано ординатами горизонтально заштрихованных треугольников.



IX X XI XII I II III IV V VI VII VIII

Рис. 5.1. Полная суммарная кривая (первый вариант)



IX X XI XII I II III IV V VI VII VIII

Рис. 5.2. Полная суммарная кривая (второй вариант)

По второму варианту регулирования (рис. 5.2) суммарная кривая отдачи перемещается параллельно себе вверх на величину суммарного объема холостых сбросов. Построение графика работы водохранилища по этому варианту начинают с момента, когда $V_{плз}=0$, т.е. от крайней правой точки кривой $\sum W_p$ проводят влево нижнюю касательную, параллельную кривой отдачи $\sum U$, до пересечения ее с кривой притока $\sum W_p$. Эта точка соответствует концу сброса и началу наполнения. Величины холостых сбросов показаны вертикальными отрезками в конце месячных интервалов времени. Объемы воды в водохранилище в искомый момент времени можно определить как разность ординат кривой стока и нижней касательной (на графике они изображены вертикальной штриховкой).

Разностная интегральная (суммарная) кривая характеризует последовательный ход изменений величин $\sum(W_p - U)$ во времени:

$$\sum W_p - \sum U = f(t) \quad (5.3)$$

Для построения разностной кривой вычисление производится в гр. 7 табл.

5.1. Разностная суммарная кривая имеет следующие свойства:

- если $W_p > U$ - кривая идет вверх, что соответствует наполнению водохранилища;
- если $W_p < U$ - кривая идет вниз, водохранилище срабатывается;
- если $W_p = U$ - кривая имеет перегиб.

На оси ординат (рис. 5.3) откладывают разности суммарных объемов стока и требуемой отдачи от начала водохозяйственного года. За абсцисс

принимают горизонтальную линию расходов требуемой отдачи. На оси абсцисс откладывают время по месячным интервалам от начала водохозяйственного года. Строят две разностные суммарные кривые - одну для построения графика работы водохранилища по первому варианту регулирования, другую - для второго варианта. Порядок расчета по разностной суммарной кривой не отличается от расчета по интегральным кривым в прямоугольных координатах.

Полезный объем водохранилища по разностной суммарной кривой, исходя из ее свойств, определяют как наибольшее из вертикальных расстояний между двумя точками: предыдущей наивысшей и последующей наинизшей (рис. 5.3 и 5.4).

График работы водохранилища по первому варианту строят следующим образом: из каждой точки перегиба кривой проводят вниз вертикальные (вспомогательные) линии, от начала координат откладывают ординату, равную $V_{плз}$, и от этой точки проводят горизонтальную линию до пересечения с первой вертикальной линией. Точка пересечения горизонтальной линии с разностной суммарной кривой показывает наполнение водохранилища до величины $V_{плз}$, и начало первого сброса, а пересечение с вертикалью, что совпадает с концом X месяца, - конец этого сброса (рис. 5.3). В период XI - III месяцы происходит сработка воды из водохранилища, а в точке начала IV месяца сработка сменяется наполнением. Продлив горизонтальную линию, смещенную на величину первого сброса, до пересечения с разностной суммарной кривой, получают начало второго сброса, а пересечение с вертикалью - конец его. В период сброса водохранилища стоит наполненным до *НПУ*.

Далее от каждой точки перегиба откладывают вниз $V_{плз}$ и находят период заполнения водохранилища.

Начало сработки водохранилища соответствует концу сброса. Объемы сбросов равны их конечным ординатам.

График работы водохранилища при расчете по разностной суммарной кривой для второго варианта регулирования получают, смещая кривую параллельно себе на величину холостого сброса.

Возможно получить график работы водохранилища по вариантам регулирования обычным приемом - провести влево от точки нижнего касания,

совпадающей с концом периода регулирования (VIII месяц), линию, параллельную оси абсцисс. Касательную доводят до точки пересечения с разностной интегральной кривой. Момент пересечения является моментом начального наполнения и концом сброса. Сбросы по II варианту производят при сработавшем водохранилище, а наполнение отодвигают на более поздний срок (рис. 5.4).

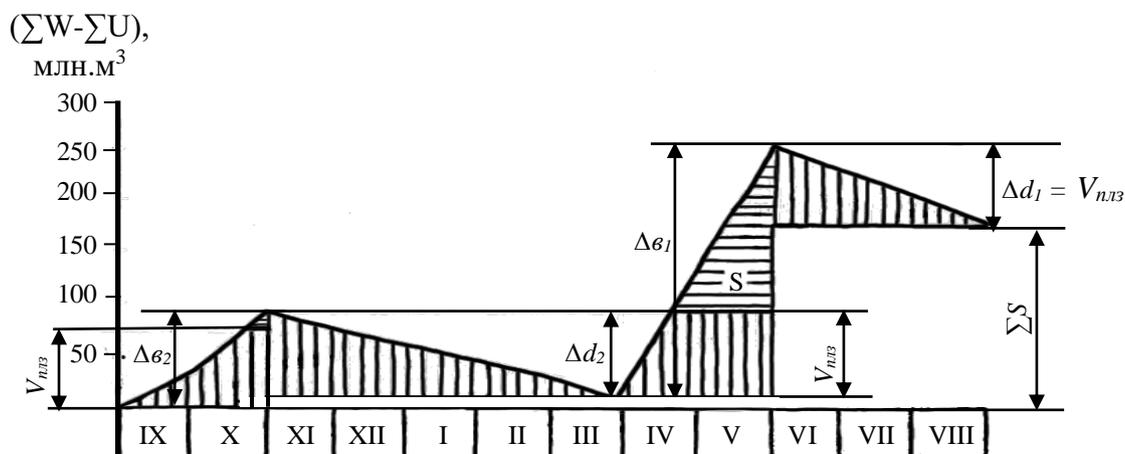


Рис. 5.3. Определение V_{nlz} и построение графика работы водохранилища по разностной суммарной кривой (вариант I)

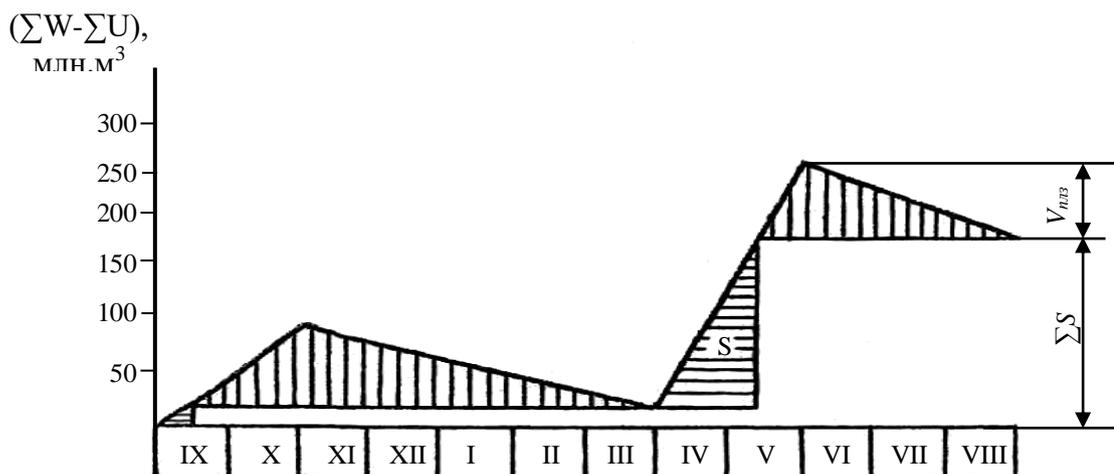


Рис. 5.4. Определение V_{nlz} и построение графика работы водохранилища по разностной суммарной кривой (вариант II)

При любых способах построения графиков работы водохранилища расчет с использованием разностной кривой наиболее прост и нагляден.

Чаще всего метод расчета по разностной суммарной кривой называют графоаналитическим. Определение сработок, объемов избыточного стока,

границ периодов аналогично рассмотренному расчету по суммарным кривым в прямоугольных координатах.

Сокращенная интегральная (суммарная) кривая строится по данным об объемах стока и отдач за каждый конкретный месяц, сниженных на величину среднемесячного объема, определенного для годового периода, или по разности расходов стока и отдач средних для конкретного месяца и среднемесячного расхода за период регулирования. Сокращенная интегральная кривая W' выражается уравнением:

$$W' = \int_0^e (Q - \bar{Q}) dt, \quad (5.4)$$

где \bar{Q} - некоторый постоянный расход.

В работе в качестве постоянного расхода W_{CP} принимают среднемесячный приток:

$$W_{CP} = \sum_1^{12} W_p / 12 = 68 \text{ млн. м}^3 \quad (5.5)$$

Ординаты сокращенной суммарной кривой притока (гр. 10 табл. 5.1):

$$W' = \sum_t^n W_p - \sum_t^n W_{CP} \quad (5.6)$$

Ординаты сокращенной суммарной кривой потребления (гр. 11):

$$U' = \sum_t^n U_p - \sum_t^n W_{CP}, \quad (5.7)$$

На оси ординат откладывают разности объемов: положительные - вверх от оси абсцисс, отрицательные - вниз (рис. 5.5, 5.6).

В том случае, когда среднемесячный расход за годовой период округляют до целых кубометров в секунду, конечная ордината сокращенной суммарной кривой стока не равняется нулю. При равенстве расхода среднемесячному за период регулирования ордината суммарной кривой стока имеет в конце периода нулевое значение.

Для рассматриваемого случая вычитаемый объем точно принят равным среднемесячному объему за год и ордината сокращенной суммарной кривой в конце периода действительно имеет нулевое значение.

Определяемые ординаты сокращенных кривых стока и отдачи могут иметь как положительное, так и отрицательное значение, так как равны разности объемов. Как видно из рис. 5.5, 5.6 для суммарной кривой отдачи все значения ординат отрицательны, а соответственно и тангенсы углов наклона касательных к кривой отдачи с осью абсцисс имеют отрицательный знак.

Действительные средние расходы каждого конкретного месяца, определенные по сокращенной кривой, равны сумме тангенсов двух углов в масштабах времени и объемов.

Выбор масштаба объемов при расчете по сокращенным суммарным кривым облегчается, чертеж становится более компактным.

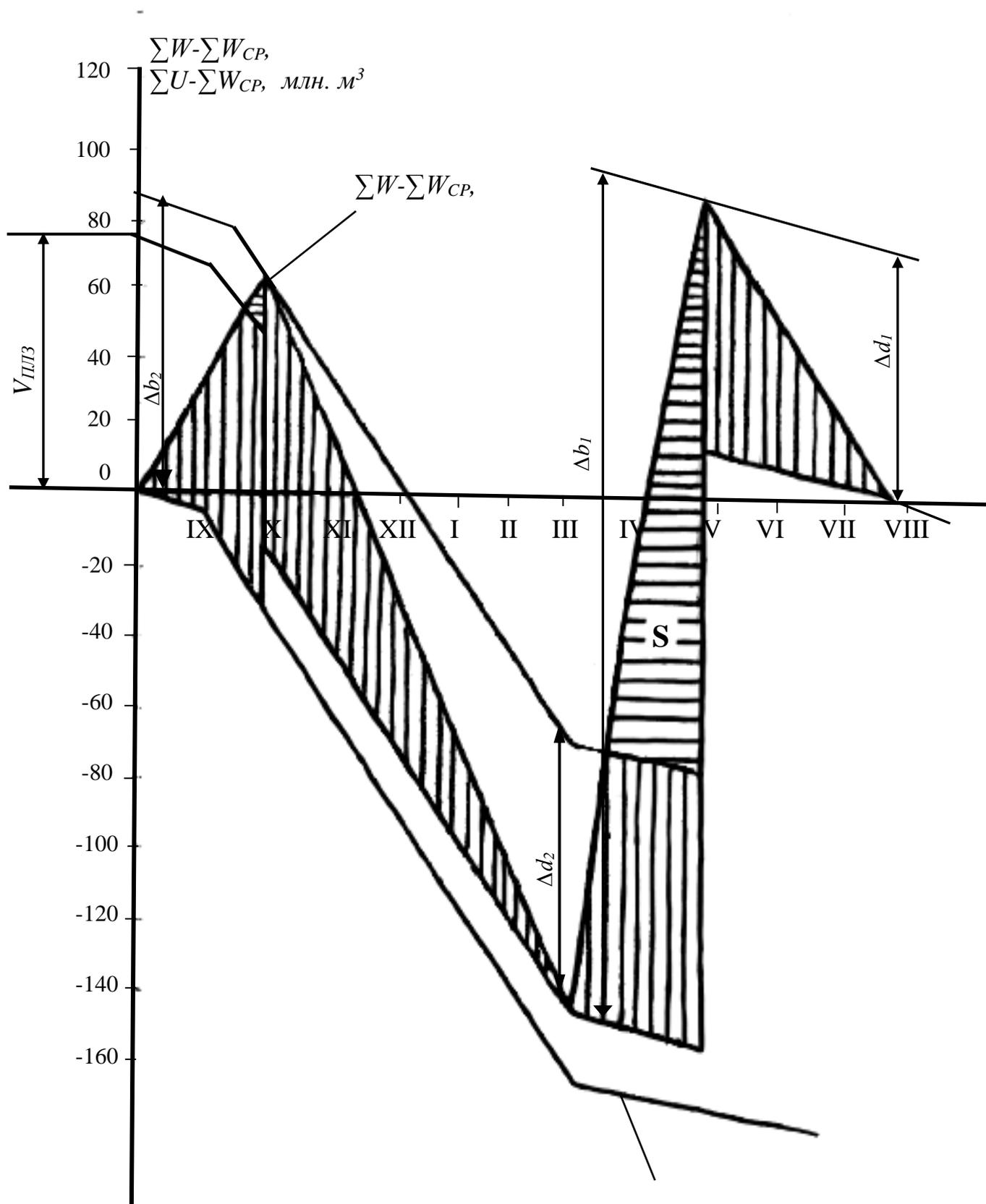
Полезный объем и график работы определяют по тому же правилу, что и для полной суммарной кривой.

Таким образом, выше мы рассмотрели пример таблично-балансового и графического расчета по двум вариантам регулирования с независимым циклом.

Работа водохранилища с зависимым циклом рассматривается в таблице 5.2. Правило расчета по вариантам регулирования одинаково для всех циклов работы водохранилища. А начало водохозяйственного года при зависимом цикле совпадает с периодом окончания большего из дефицитов, т.е. после Δd_2 (второго дефицита), так как $\Delta b_2 < \Delta d_2$, но $\Delta b_2 > \Delta d_1$ и не может удовлетворить потребителей, т.е. плановую отдачу, и наполнение следует производить из первых избытков, которые по величине своего объема могут удовлетворить и Δd_1 и Δd_2 . Как видно из табл. 5.2, начало водохозяйственного года приходится на конец II и начало III месяца.

И при графическом расчете, данные к построению суммарных интегральных кривых располагают также с начала водохозяйственного года, т.е. с III месяца (см. табл. 5.3). Правила графического расчета едины и приводятся выше. Следует сопоставить полезный объем, определенный таблично-балансовым методом и графическим путем, т.е. $V_{\text{поз}} = (\Delta d_1 + \Delta d_2) - \Delta b_2$, и глядя на ординаты полных (рис. 5.7., 5.8), разностных (рис. 5.9, 5.10) и сокращенных (рис. 5.11, 5.12) кривых, где полезный объем находится как

наибольшее из вертикальных расстояний между наивысшей точкой, которая приходится на V месяц водохозяйственного года, и наинизшей точкой, которая совпадает с концом водохозяйственного года, т.е. II месяцем, видим между ними величины дефицита (Δd_1 и Δd_2) и второго избытка.



$$\Sigma U - \Sigma W_{CP}$$

Рис. 5.5. Сокращенная суммарная кривая (вариант I)

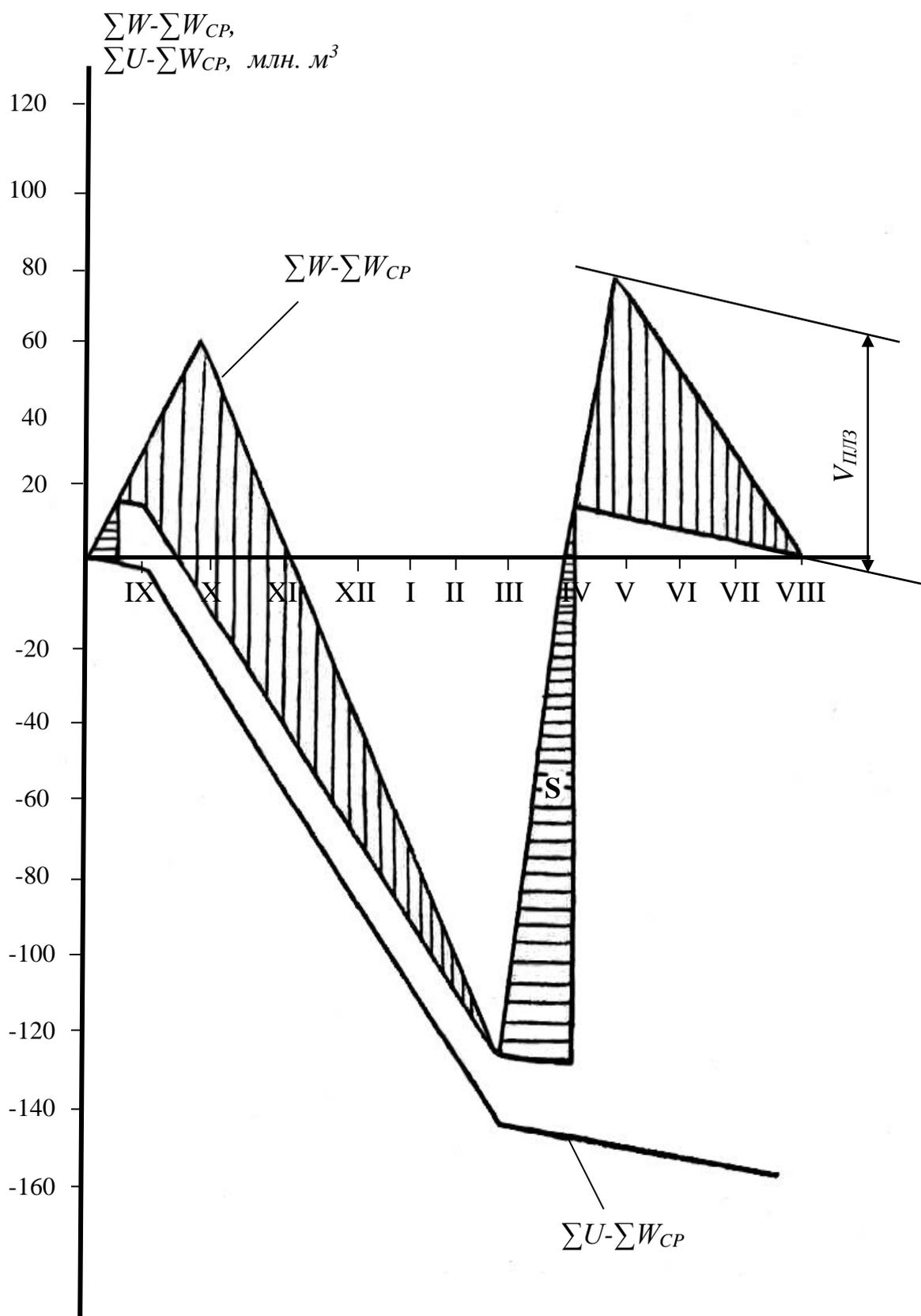


Рис. 5.6. Сокращенная суммарная кривая (вариант II)

Таблица 5.2. Расчет водохранилища сезонного регулирования (объемы стока, отдач, потерь и наполнений, млн. м³)

Месяцы	Расчётный сток W_p	Плановая отдача U	Наполнение без учёта потерь млн. м ³					
			$W - U$		1 вариант		2 вариант	
			+	-	конечное V_K	сброс S	конечное V_K	сброс S
1	2	3	4	5	6	7	8	9
					125		125	
III	100	52	48		173		125	48
IV	310	53	257		342	88	282	100
V	205	145	60		342	60	342	
VI	105	145	$\Delta b_1 =$	40	302		302	
VII	53	145	365	92	210		210	
VIII	63	144		81	129		129	
IX	68	53	15	$\Delta d_1 =$	144		144	
X	74	53	21	213	165		165	
XI	53	52	1		166		166	
XII	42	52	$\Delta b_2 =$	10	156		156	
I	34	52	37	18	138		138	
II	39	52		13	[125]		[125]	
$\Sigma W = 1146$ $\Sigma U = 998$				$\Delta d_2 =$		$\Sigma S = 148$		$\Sigma S = 148$
				41				

Сочетание $\Delta b_1 > \Delta d_1$, $\Delta b_2 < \Delta d_2$, $\Delta b_2 < \Delta d_1$ и определяет зависимый цикл.
 $V_{\text{плз}} = (\Delta d_1 + \Delta d_2) - \Delta b_2 = 217$ млн. м³, $V_{\text{НПУ}} = V_{\text{плз}} + V_{\text{мо}} = 217 + 125 = 342$ млн. м³
(мертвый объем принят условно). Контроль вычислений: $\Sigma S = \Sigma W - \Sigma U = 1146 - 998 = 148$ млн. м³

Таблица 5.3. Данные для построения суммарных кривых стока и отдачи

Месяцы	W	U	ΣW	ΣU	$\Sigma W - \Sigma U$	ΣW_{CP}	$\Sigma W - \Sigma W_{CP}$	$\Sigma U - \Sigma W_{CP}$
1	2	3	4	5	7	9	10	11
			0	0	0	0	0	0
III	100	52	100	52	48	96	4	-44
IV	310	53	410	105	305	191	219	-81
V	205	145	615	250	365	287	328	-78
VI	105	145	720	395	325	382	338	13
VII	53	145	773	540	233	478	295	62
VIII	63	144	836	684	152	573	263	111

IX	68	53	904	737	167	669	235	68
X	74	53	978	790	188	765	213	25
XI	53	52	1031	842	189	860	171	-18
XII	42	52	1073	894	179	956	117	-62
I	34	52	1107	946	161	1051	56	-105
II	39	52	1146	998	148	1146	0	-148

$$\sum W_{CP} = 95,5$$

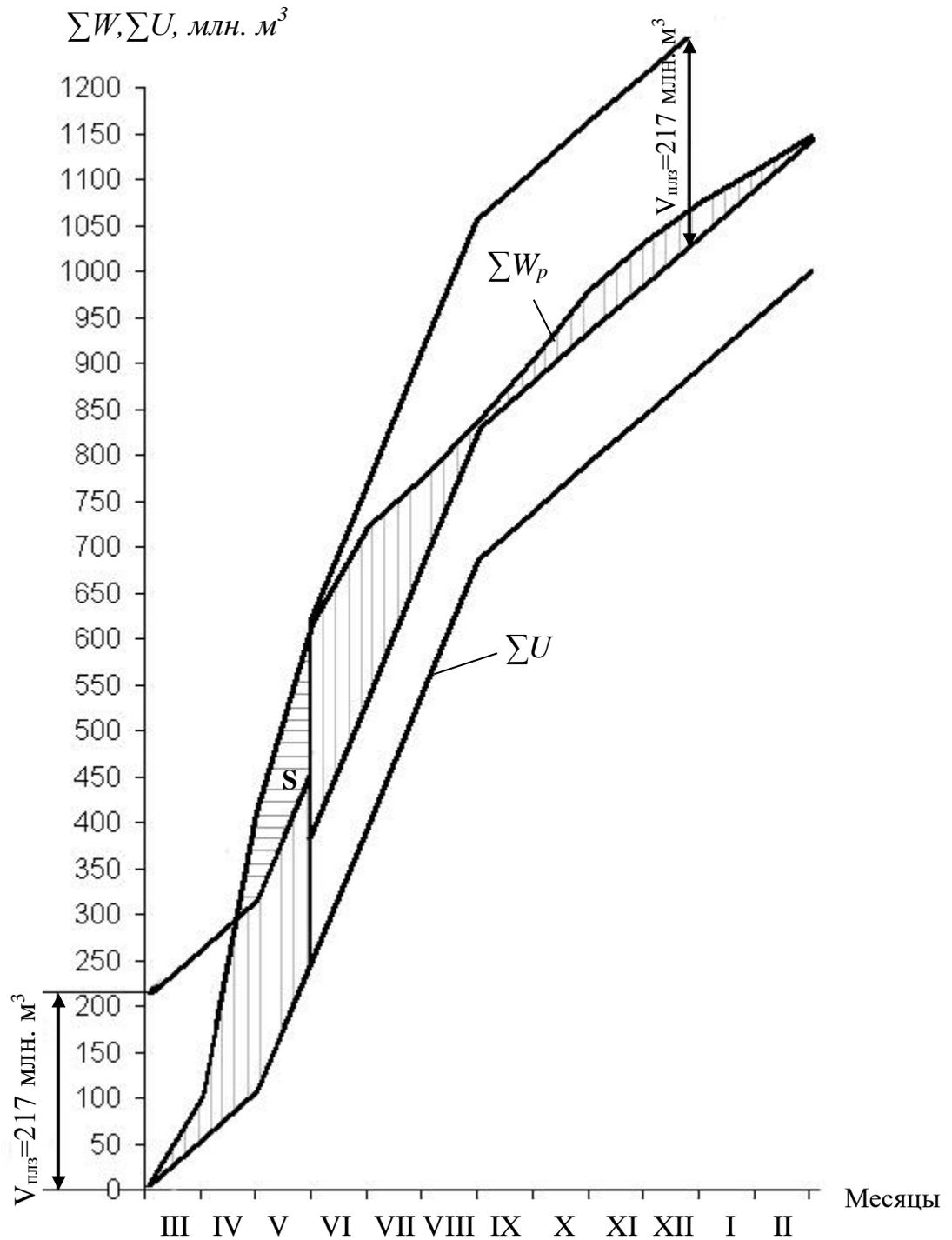


Рис. 5.7. Полная суммарная крива (вариант I)

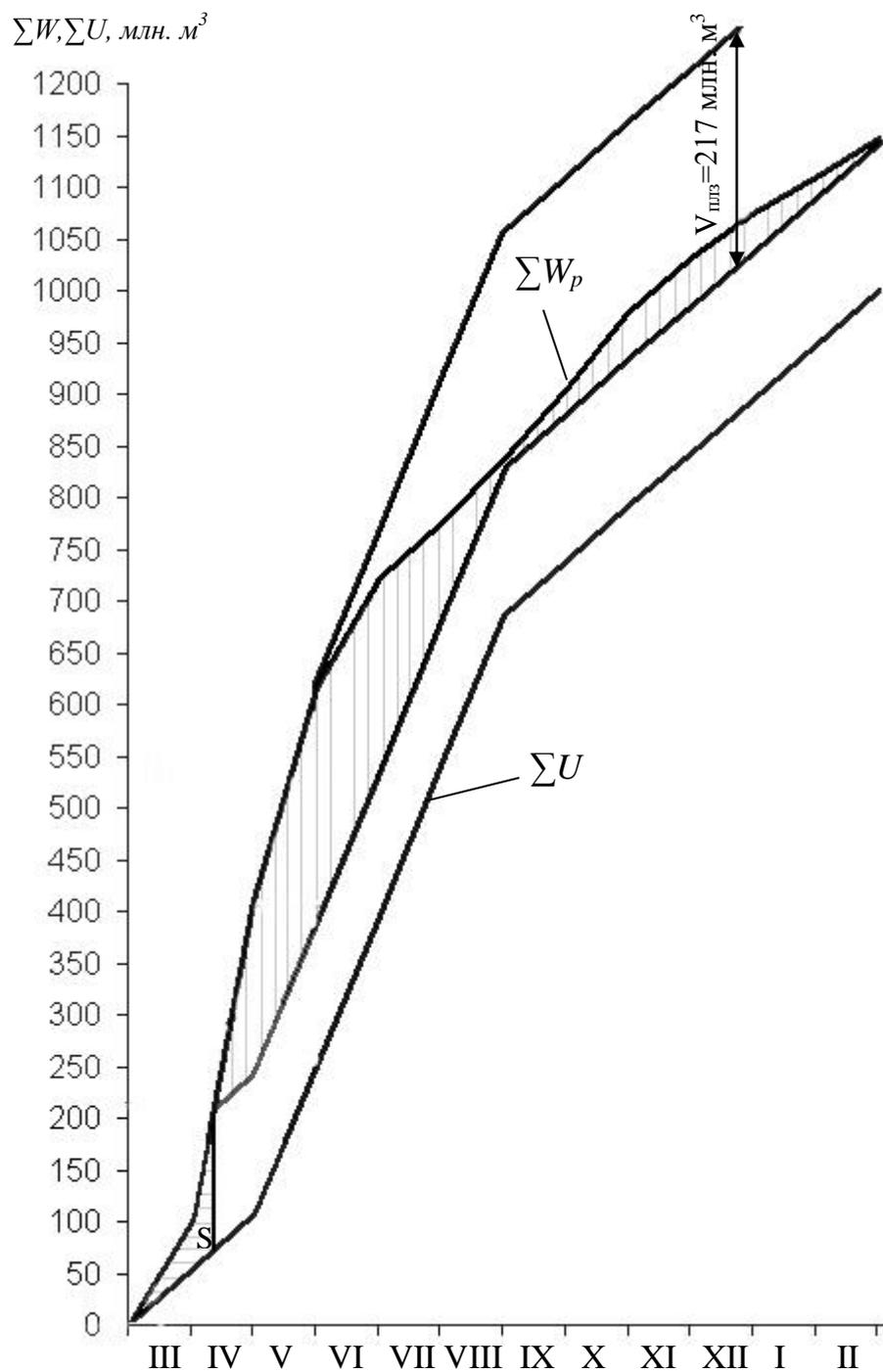


Рис. 5.8. Полная суммарная кривая (вариант II)

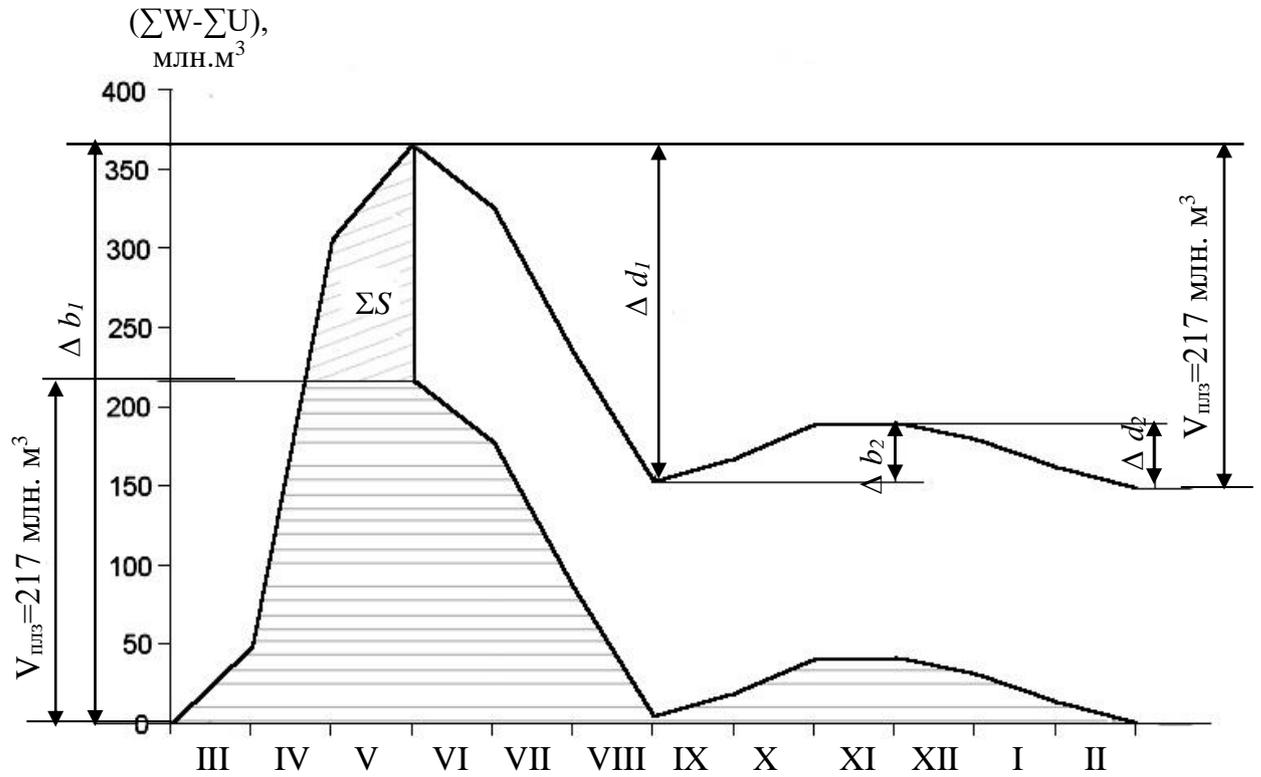
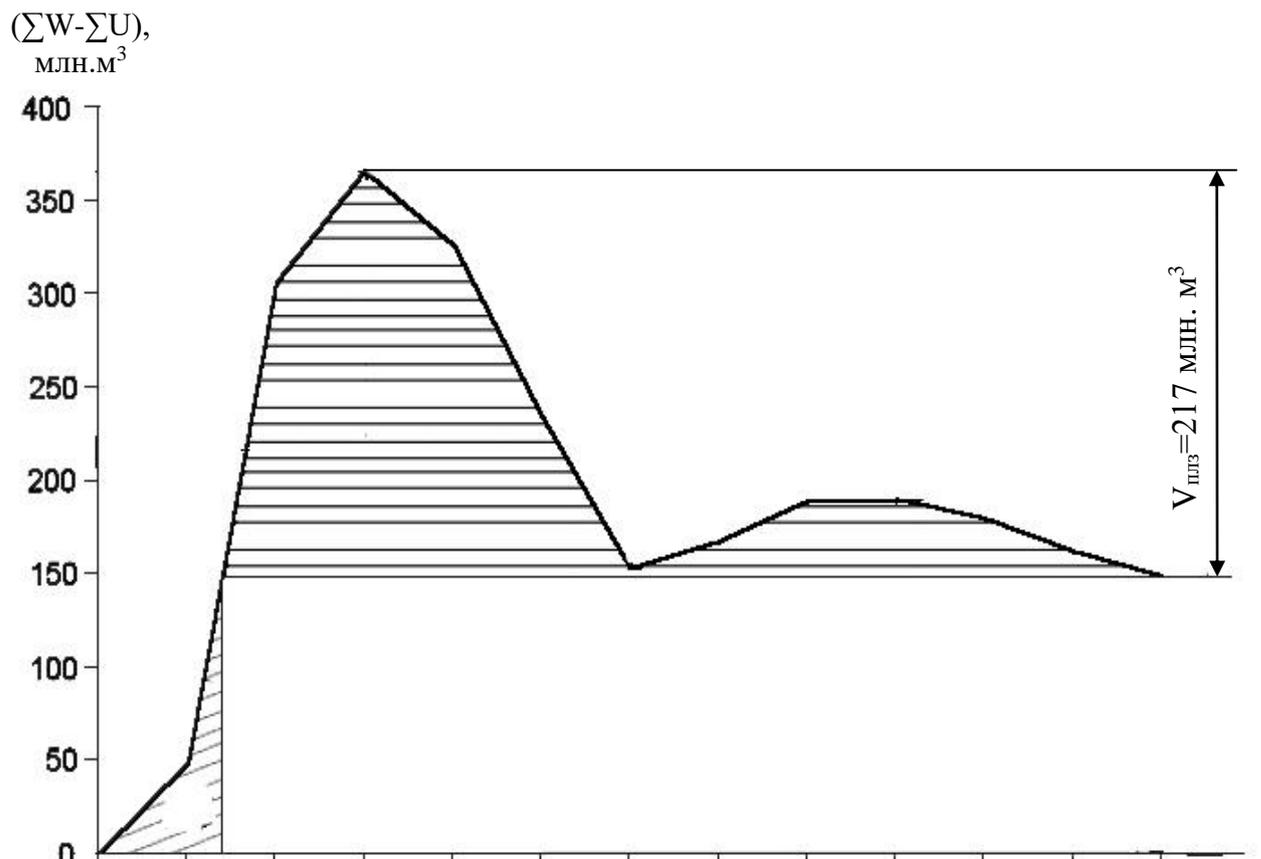


Рис. 5.9. Разностная суммарная кривая (вариант I)



ΣS
III IV V VI VII VIII IX X XI XII I II

Рис. 5.10. Разностная суммарная кривая (вариант II)

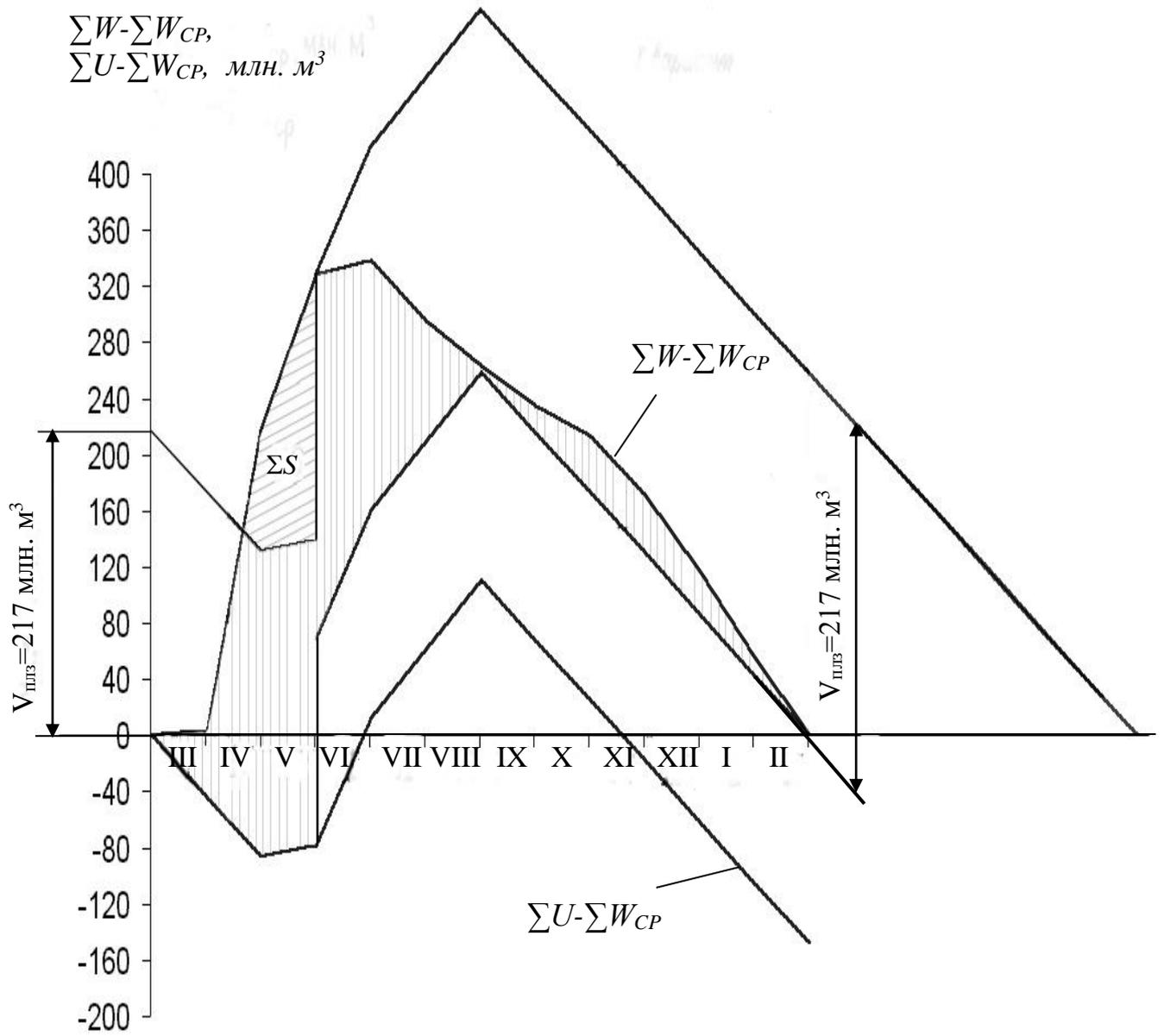


Рис. 5.11. Сокращенная интегральная кривая (вариант I)

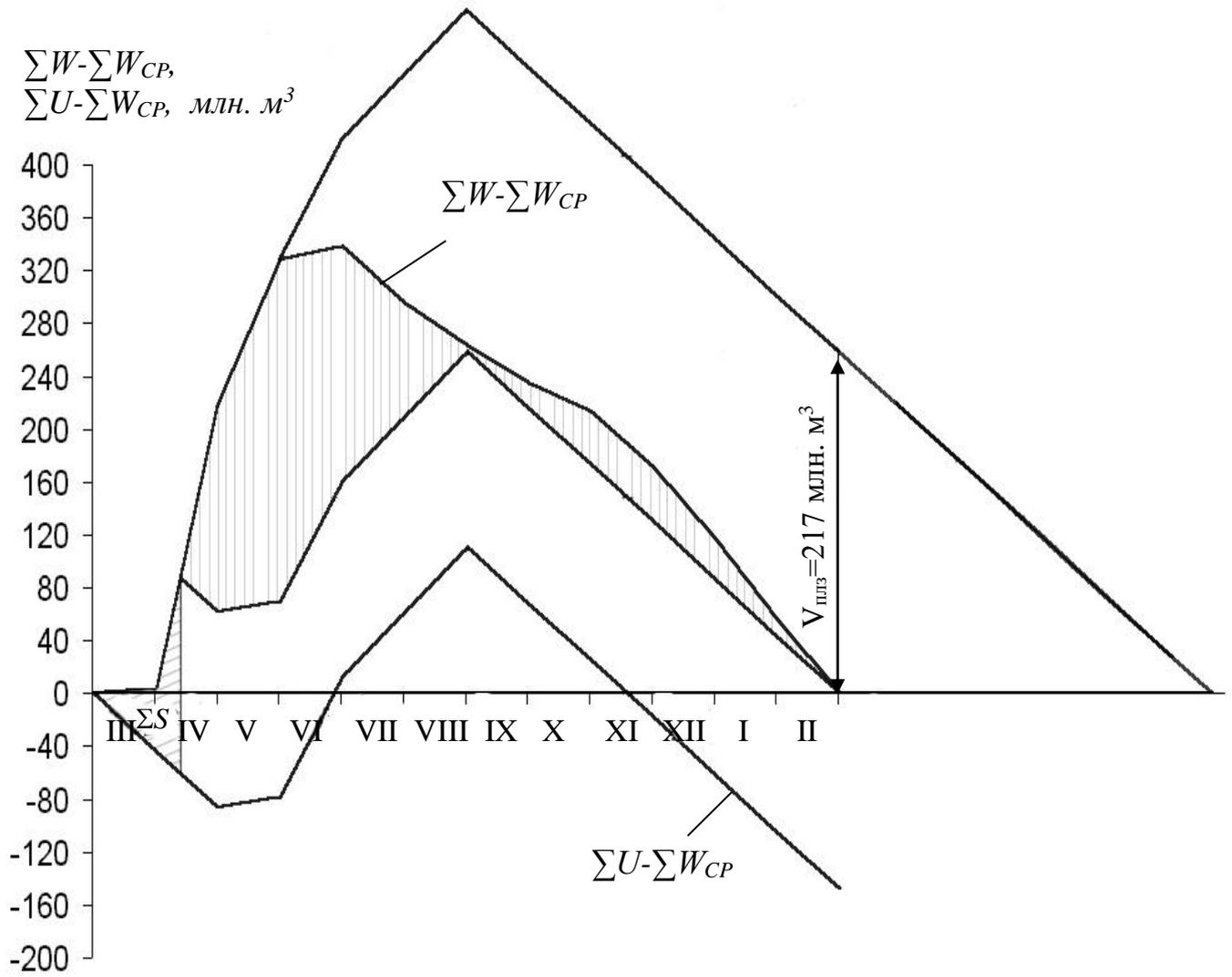


Рис. 5.12. Сокращенная интегральная кривая (вариант II)

6. Расчет водохранилища многолетнего регулирования стока

Многолетнее регулирование предназначено для перераспределения стока как внутри года, так и за ряд лет. Цикл регулирования продолжается в течение многолетнего периода. Полная сработка водохранилища до мертвого объема происходит в маловодные годы. Многолетнее регулирование проектируют в том случае, когда годовая отдача с учетом потерь превышает расчетный сток за год.

При расчетах многолетнего регулирования стока наиболее широко используют метод С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля. Согласно данному методу полезный объем водохранилища многолетнего регулирования стока принимают:

$$V_{ПЛЗ} = V_{МН} + V_{сез}, \quad (6.1)$$

где $V_{МН}$ и $V_{сез}$ - соответственно многолетняя и сезонная составляющие полезного объема, м³.

Сток, отдачу, объем водохранилища и другие параметры регулирования для удобства принято выражать в долях от среднемноголетнего объема стока:

Сток – модульным коэффициентом (отношение стока данного года к норме стока)

$$K_i = W_i / \bar{W}, \quad (6.2)$$

величину полной отдачи - коэффициентом зарегулирования стока

$$\alpha = U / \bar{W}, \quad (6.3)$$

При этом емкость водохранилища, или его объем, обозначается коэффициентом объема β , т.е.

$$\beta = V_i / \bar{W}, \quad (6.4)$$

где V_i - емкость водохранилища, млн. м³.

По методу С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля многолетнюю составляющую объема водохранилища $V_{МН}$ определяют с помощью графиков – номограмм. Наиболее широко применяют обобщенные графики Г.Г. Сванидзе, В.В. Зубарева и А.Ш. Резниковского. На них представлена зависимость коэффициента объема $\beta_{МН}$ многолетней составляющей от коэффициента зарегулирования стока α ,

коэффициента изменчивости годового стока C_v , коэффициента асимметрии C_s , коэффициента корреляции между стоком смежных лет r и обеспеченности p % (см. приложение 2).

По зависимости

$$V_{MH} = \beta_{MH} \bar{W} \quad (6.5)$$

вычисляют многолетнюю составляющую объема водохранилища.

Сезонную составляющую объема V_{ces} рассчитывают из условия необходимости покрытия дефицита в воде в первый год после окончания маловодного периода, то есть когда многолетний запас исчерпан. Считают, что в расчетном году сток равен отдаче, то есть $K_{P.G.} = \alpha$. Для этого случая

$$\beta_{ces} = \alpha(t_M - \bar{m}_M), \quad (6.6)$$

где t_M – длительность межени, в долях года; \bar{m}_M – доля меженного стока в среднегодовом.

Определив β_{ces} , находят сезонный объем, m^3 ,

$$V_{ces} = \beta_{ces} \bar{W}, \quad (6.7)$$

а затем по зависимости (6.1) – полезный объем водохранилища многолетнего регулирования стока.

Полный объем водохранилища многолетнего регулирования стока, m^3 , определяется:

$$V_{НПУ} = V_{МО} + V_{ПЛЗ} = V_{МО} + V_{MH} + V_{ces}, \quad (6.8)$$

Практическое определение емкости водохранилища многолетнего регулирования методом Г. И. Крицкого и М. Ф. Менкеля сводится к следующему:

1. Определяют норму стока \bar{W} и коэффициент вариации C_v . В работе эти величины принимают по варианту проектного задания: $\bar{W} = 1224$ млн. m^3 , $C_v = 0,67$.
2. Вычисляют коэффициент зарегулирования исходя из требований водопользователей при расчетной обеспеченности P (%), а также годовую отдачу (если она неизвестна):

$$\alpha = U / \bar{W}, \quad \text{тогда } U = \alpha \bar{W} \quad (6.9)$$

3. Определяют коэффициент многолетней составляющей емкости водохранилища β_{mn} по методу С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля с помощью графиков Г. Г. Сванидзе при $C_s=2C_v$ и коэффициенте корреляции между годовым стоком смежных лет $r = 0$. По графикам (прил. 2) определяют β_{mn} как функцию $\beta_{mn} = f(P, \alpha, C_v, C_s, r)$. При $P = 90 \%$; $\alpha = 0,7$; $C_v = 0,67$; $C_s = 1,34$; $r = 0$, $\beta_{mn} = 0,64$.

4. Устанавливают многолетнюю составляющую емкости водохранилища: $V_{mn} = \beta_{mn} \cdot \bar{W} = 0,64 \cdot 1224 = 734$ млн. м³.

5. Вычисляют коэффициент сезонной составляющей емкости водохранилища по формуле (6.6) (при $\alpha = 0,7$ и $\bar{m}_M = 0,3$, $t_M = \frac{10}{12}$, $\beta_{ces} = 0,43$).

6. Рассчитывают сезонную составляющую емкости водохранилища:

$$V_{ces} = \beta_{ces} \cdot \bar{W} = 0,43 \cdot 1224 = 526 \text{ млн. м}^3$$

Определение полезного и полного объема водохранилища многолетнего регулирования производят следующим образом: $V_{плз} = V_{mn} + V_{ces} = 734 + 526 = 1260$ млн. м³

$$V_{НПУ} = V_{плз} + V_{мо} = 1260 + 100 = 1360 \text{ млн. м}^3$$

Полному объему ($V_{НПУ} = 1360$ млн. м³) соответствует отметка уровня воды $H_{НПУ} = 132,6$ м (см. рис. 1.3).

В современной практике проектирования для расчетов водохранилищ многолетнего регулирования применяют также метод, по которому расчеты производят по календарному гидрологическому ряду (при наличии наблюдений).

Для проверки правильности расчета водохранилища многолетнего регулирования стока используют метод вероятных вариантов А. Д. Саваренского. Расчет этим методом позволяет установить параметры водохранилища (конечные наполнения), фактические отдачи, дефициты, сбросы для различных лет водности при заданных размерах водохранилища.

Расчет ведут в следующей последовательности:

балансовый таблично-цифровой расчет многолетнего регулирования выполняют для пяти лет водности и трех групп начальных наполнений, принимая следующие по водности годы: $P = 5 \%$; $P = 25 \%$; $P = 50 \%$; $P = 75 \%$; $P = 90 \%$.

Наполнения водохранилища изменяют от $V_{мо}=100$ млн. м³ до $V_{нпу}= 1360$ млн. м³ и делят на три группы начальных наполнений:

1. $V_n = V_{мо} = 100$ млн. м³;
2. $V_n = \frac{V_{мо} + V_{нпу}}{2} = \frac{100 + 1360}{2} = 730$ млн. м³;
3. $V_n = V_{нпу} = 1360$ млн. м³.

Расчет производят в табл. 6.1 в соответствии с исходными данными: $\bar{W} = 1224$; $C_v = 0,67$; $C_s = 2$ $C_v = 1,34$; $U = 820$ млн. м³.

В графах 1-3 записывают соответственно: 1 - номер группы начального наполнения; 2 - объем начального наполнения; 3 - обеспеченность выбранных лет водности, выраженная в долях. В гр. 5 вычисляют годовой сток W_p для каждой принятой обеспеченности:

$$W_p = K_p \bar{W}, \quad (6.10)$$

где K_p - ордината теоретической кривой обеспеченности, определяемая по таблицам ординат кривых трехпараметрического гамма-распределения (прил.1) значения K_p заносят в графу 4.

В гр. 7-8 определяют V_ϕ - фиктивное наполнение без учета потерь воды для водохранилища неограниченной емкости, как $V_\phi = W_p + V_n - U$; в гр. 9 - V_k - конечное наполнение без учета потерь к концу каждого года рассчитывают из следующих условий:

$$\text{при } V_\phi > V_{нпу} \quad V_k = V_{нпу};$$

$$\text{при } V_{нпу} > V_\phi > V_{мо} \quad V_k = V_\phi;$$

$$\text{при } V_\phi \leq V_{мо} \quad V_k = V_{мо}.$$

Для определения параметров водохранилища с учетом потерь вычисляют средний объем водохранилища $V_{ср}$ и среднюю площадь зеркала $\omega_{ср}$ за каждый год. Данные заносят в графы 10, 11.

$$V_{ср} = V_n + V_k / 2, \quad (6.11)$$

Среднюю площадь зеркала находят в зависимости от среднего объема по объемной характеристике водохранилища $\omega_{cp} = f(V_{cp})$ (см. рис. 1.3);

В гр. 12 - $E_{д}$ - средний многолетний слой дополнительных потерь на испарение определяется по формуле 3.2; в гр. 13 - Φ - слой потерь на фильтрацию за год (по данным проектного задания) м; гр. 14 - W_{nom} - объем потерь на испарение и фильтрацию при средней площади зеркала водохранилища равен:

$$W_{nom} = (E_{д} + \Phi) \cdot \omega_{cp} \quad (6.12)$$

В гр. 15-16 - V'_{ϕ} - фиктивное наполнение с учетом потерь, определяют как

$$V'_{\phi} = V_n + W_P - U - W_{nom} \quad (6.13)$$

В гр. 17 - V'_K - конечное наполнение водохранилища с учетом потерь, устанавливают исходя из тех же условий, что и при расчете V_K без учета потерь.

В гр. 18 - S - холостые сбросы, имеют место, когда фиктивное наполнение с учетом потерь больше объема при *НПУ*:

$$S = V'_{\phi} - V_{НПУ} \quad (6.14)$$

В гр. 19 - D - дефицит отдачи, имеет место, когда $V'_{\phi} < V_{mo}$, вычисляется как

$$D = V_{mo} - V'_{\phi} \quad (6.15)$$

В гр. 20 - U_{ϕ} - фактическая отдача (плановая):

$$U_{\phi} = V_n + W_P - W_{nom} - S - V'_K \leq U,$$

т.е. при отсутствии дефицита отдачи фактическая отдача равна плановой, а при наличии дефицита:

$$U_{\phi} = U - D \quad (6.16)$$

Рассмотрение результатов регулирования показывает, что из трех групп наполнений для 5 лет водности требуемая отдача не обеспечивается в два последних года при начальном наполнении $V_n = 100$ млн. м³ и $P = 75$ и 90 %.

По данным табл. 6.1 строят условные кривые обеспеченности конечных наполнений фактических отдач и сбросов.

Условные кривые обеспеченностей конечных наполнений строят в прямоугольных координатах. На оси абсцисс откладывают обеспеченности в долях единицы, на оси ординат - конечные наполнения. Этот график является наиболее важной характеристикой результата регулирования стока, используемой для последующих этапов расчета.

Таблица 6.1. Вспомогательный расчет водохранилища многолетнего регулирования по методу вероятных вариантов

А. Д. Саваренского (объемы стока, отдач, сбросов, потерь и наполнений, млн. м³) $C_v = 0,67$; $C_s = 2 C_v$; $V_{нну} = 1360$ млн. м³; $V_{мо} = 100$ млн. м³; $\bar{W} = 1224$ млн м³

Группа наполнения	Начальное наполнение V_n	Обеспеченность, P	K_p	Сток W_p	Отдача по плану U	Наполнение без учёта потерь			Расчёт с учётом потерь					Наполнение с учётом потерь			Сброс S	Дефицит отдачи D	Фактическая отдача U_ϕ
						фиктивное V_ϕ		конечное V_k	средний объём V_{cp}	ср. площадь зеркала ω_{cp} км ²	слой потерь, м		объём потерь $W_{пот}$	фиктивное V'_ϕ		конечное V'_k			
						+	-				на испаре ние	на фльтра цию Φ		+	-				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
I	100	0,05	2,29	2801	820	2081	-	1360	730	126	0,2	0,36	70	2011	-	1360	651	-	820
	100	0,25	1,33	1631	820	911	-	911	506	100	0,2	0,36	56	855	-	855	-	-	820
	100	0,50	0,86	1051	820	311	-	331	216	60	0,2	0,36	36	295	-	295	-	-	820
	100	0,75	0,52	637	820	-	73	100	100	40	0,2	0,36	22	-	95	100	-	195	625
	100	0,90	0,29	355	820	-	365	100	100	40	0,2	0,36	22	-	387	100	-	487	333
II	730	0,05	2,29	2801	820	2711	-	1360	1045	158	0,2	0,36	88	2623	-	1360	1263	-	820
	730	0,25	1,33	1631	820	1541	-	1360	1045	158	0,2	0,36	88	1453	-	1360	93	-	820
	730	0,50	0,86	1051	820	961	-	961	846	140	0,2	0,36	78	883	-	883	-	-	820
	730	0,75	0,52	637	820	547	-	547	638	114	0,2	0,36	78	469	-	469	-	-	820
	730	0,90	0,29	355	820	265	-	265	498	100	0,2	0,36	56	209	-	209	-	-	820
III	1360	0,05	2,29	2801	820	3341	-	1360	1360	190	0,2	0,36	106	3235	-	1360	1875	-	820
	1360	0,25	1,33	1631	820	2171	-	1360	1360	190	0,2	0,36	106	2065	-	1360	705	-	820
	1360	0,50	0,86	1051	820	1591	-	1360	1360	190	0,2	0,36	106	1485	-	1360	125	-	820
	1360	0,75	0,52	637	820	117	-	1177	1268	181	0,2	0,36	101	1076	-	1076	-	-	820
	1360	0,90	0,29	355	820	895	-	895	1128	167	0,2	0,36	94	801	-	801	-	-	820

7. Расчет трансформации гидрографа паводка водохранилищем

Регулирующее влияние водохранилища на максимальный расход состоит в том, что при прохождении паводка часть стока задерживается в водохранилище и уровень воды в нем превышает расчетную отметку *НПУ*, достигая форсированного подпорного уровня *ФПУ* (рис. 1.1 б). Часть паводка, задержанного водохранилищем и располагающегося между отметками *ФПУ* и *НПУ*, называется объемом форсировки V_{ϕ} .

С увеличением объема форсировки уменьшается величина сбросного расхода и стоимость сбросного сооружения. Вместе с тем увеличение объема форсировки влечет за собой увеличение высоты плотины и ее стоимости, поэтому выбор наиболее рационального значения сбросного расхода производится на основании технико-экономических расчетов.

Для водохозяйственного строительства, на малых водотоках, при отсутствии на них длительного ряда гидрометрических наблюдений, расчет трансформации гидрографа паводка водохранилищем, как правило, производится упрощенно.

В основу расчета положено предложение Д. И. Кочерина применительно к различным схемам гидрографов половодья, типам сбросных сооружений и условиям заполнения водохранилища, которое в последующем уточнялось рядом авторов: А. В. Огиевским, Д. Л. Соколовским, В. Н. Цингером.

По Д. И. Кочерину, при любой схематизации гидрографа половодья (паводка) допускается, что нарастание сбросных расходов через водослив происходит линейно. При этом условии отпадает необходимость строить гидрограф сбросов по интервалам и достаточно задаваться лишь конечной величиной его расхода.

Основные допущения, принимаемые при расчете по методу Д. И. Кочерина, следующие: расчет применим к одиночному глухому водосливу без затворов, отметка порога водослива совпадает с *НПУ*, перед половодьем водохранилище не опорожняется, оно наполнено до *НПУ*.

Емкости вычисляют по статической характеристике водохранилища. Потери воды на фильтрацию, испарение и полезную отдачу не учитывают ввиду незначительной их величины по сравнению с объемом половодья (паводка).

Простота метода расчета, взаимная компенсация погрешностей, возникающих в связи с принятием допущений и неточностью вычисления параметров стока, положительный опыт массового применения метода в условиях проектирования обусловили широкое распространение предложения Д. И. Кочерина в практических расчетах трансформации паводка.

Расчет пропуска паводка водохранилищем проводят в следующей последовательности. Основываясь на гидрографе половодья (паводка) и основных его элементах, определяют отметку уровня форсировки и величины сбросных расходов. Задаваясь значениями слоя форсировки, h_ϕ находят емкость форсировки для каждого слоя по объемной характеристике (рис. 1.3) выше отметки *НПУ*. Если гидрограф притока схематизирован по треугольнику (рис. 7.1), максимальный расход сброса по Д. И. Кочерину находят как

$$q_{\max} = Q_{\max} (1 - V_\phi / W_{\text{пр}}), \quad (7.1)$$

где Q_{\max} - максимальный расход половодья (паводка); V_ϕ - объем форсировки (объем водохранилища выше отметки *НПУ*); $W_{\text{пр}}$ - объем расчетного половодья (паводка) по треугольнику

$$W_{\text{пр}} = 0,5Q_{\max} T, \quad (7.2)$$

где T - период половодья (паводка), с.

При схематизации гидрографа по трапеции (рис. 7.2) максимальный сбросной расход по Д. И. Кочерину рассчитывают:

$$q_{\max} = (1 - V_\phi / W_{\text{пр}}) Q_{\max} / \eta, \quad (7.3)$$

где $\eta = T / (T + t)$ - коэффициент формы гидрографа. t - период устойчивого стока половодья, с.

Объем расчетного, половодья (паводка) - как площадь трапеции:

$$W_{\text{пр}} = 0,5Q_{\max} (T + t) \quad (7.4)$$

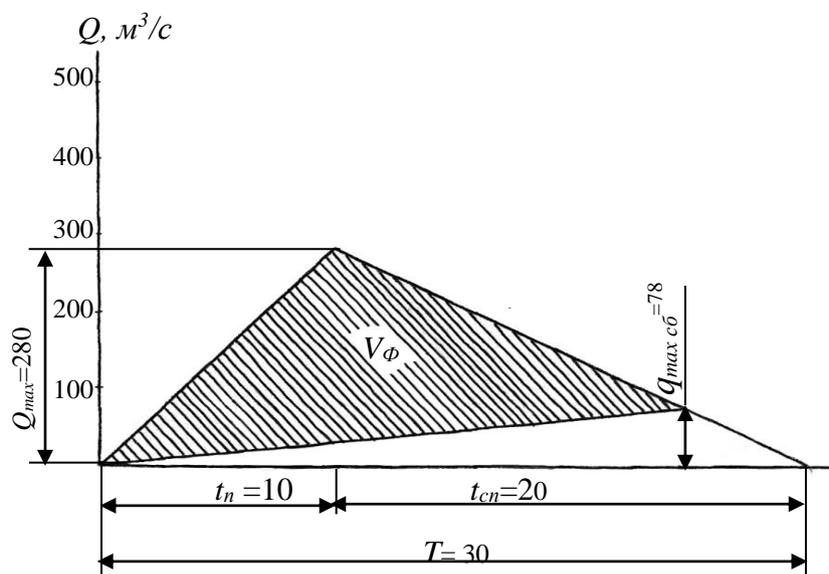


Рис. 7.1. Расчетный гидрограф паводка половодья (схематизация по треугольнику)

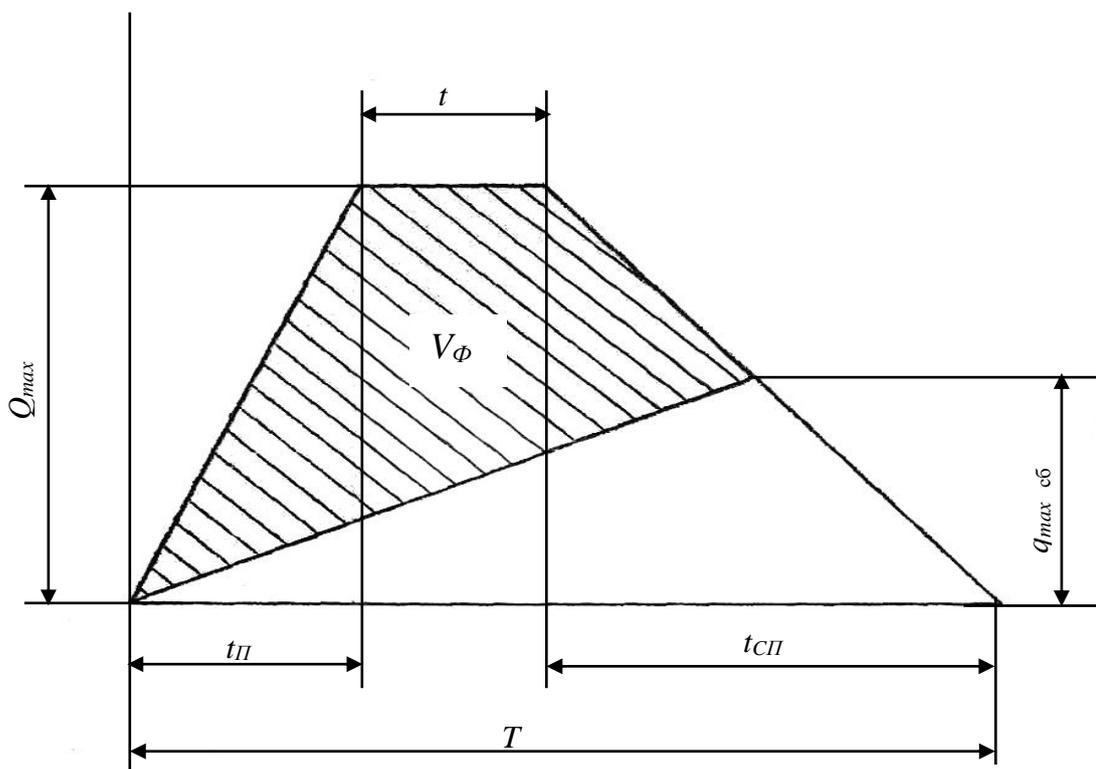


Рис. 7.2. Расчетный гидрограф паводка половодья (схематизация по трапеции)

При расчете объема притока период половодья следует переводить в секунды, т.е. количество дней паводка умножают на 86400 (число секунд в сутках).

Формула Д. И. Кочерина применима в пределах $V_\phi \leq W_{np}$ и $q_{\max} < Q_{\max}$. Данные сводят в табл.7.1.

Повторяют расчет при заданных величинах слоя форсировки и заданной ширине водослива по формуле водослива с широким порогом:

$$q_{\max} = m \cdot b \cdot \sqrt{2gh_\phi}^{3/2}, \quad (7.5)$$

где m – коэффициент расхода водослива; b – ширина водослива, м

Таблица 7.1. Расчет сбросных расходов, м³/с

по формуле Д.И. Кочерина			по формуле гидравлики		
h_ϕ	V_ϕ	$q_{\max} = Q_{\max} \left(1 - \frac{V_\phi}{W_{np}} \right)$	$q = mb\sqrt{2gh_\phi}^{3/2}$		
			$b=30$ м	$b=40$ м	$b=50$ м
0,5	100	204	20	26	33
1,0	200	126	56	74	93
1,5	340	17,6	102	136	170
2,0	400	-	158	211	263
2,5	560	-	221	294	368

На чертеже строят совмещенные кривые сбросных расходов, рассчитанных по формулам гидравлики и Д. И. Кочерина. Точки пересечения кривых дают искомые результаты для разной ширины водослива (см. рис. 7.3). Проводят технико-экономическое сравнение полученных результатов и выбирают оптимальный. В технико-экономических расчетах сравнивают, что с экономической, технической и экологической стороны наиболее приемлемо: снизить слой форсировки h_ϕ и следовательно, увеличить габариты водосбросных сооружений, либо увеличить h_ϕ , что в свою очередь повлечет увеличение высоты плотины и снижение габаритов водосбросных сооружений. При этом, необходимо помнить о том, что завышение h_ϕ может привести к временному (на период половодья) затоплению обширных территорий, особенно если прилегающая к водохранилищу местность пологая.

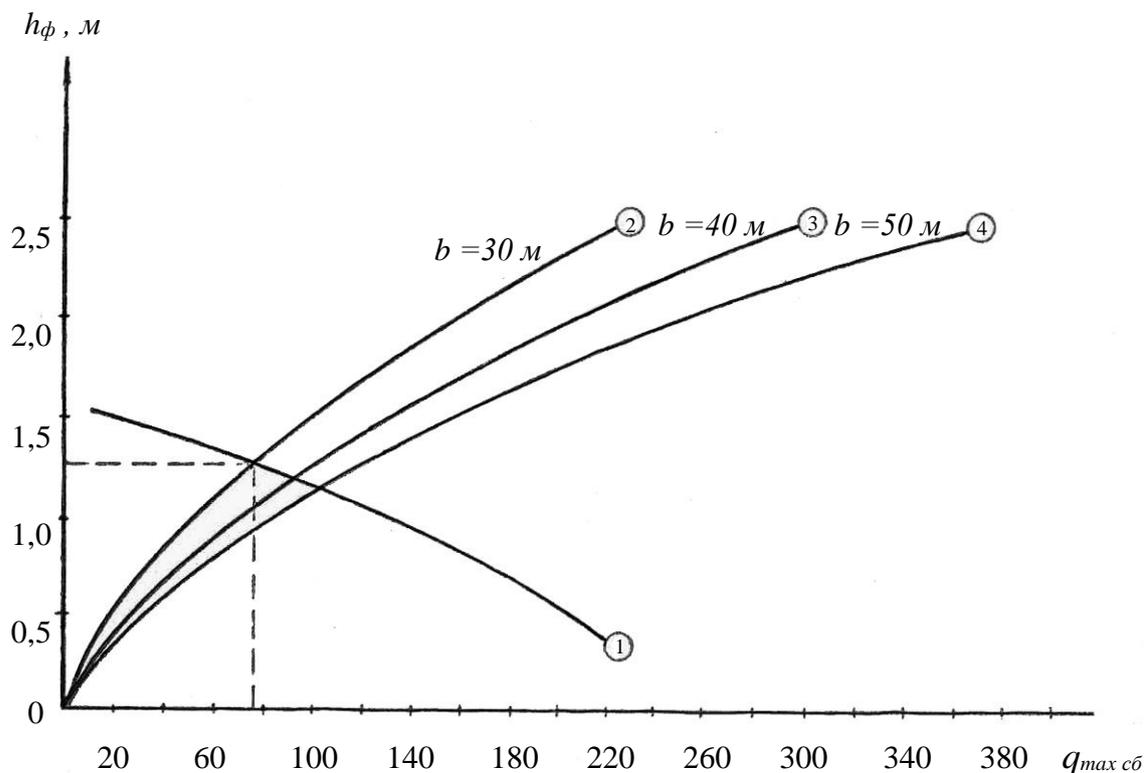


Рис. 7.3. Кривая сбросных расходов в зависимости от высоты слоя форсировки (1- кривая сбросных расходов; 2,3,4 – кривые зависимости $q_{\max \text{ сб}} = f(h_\phi)$ при ширине водослива b)

В данном случае, принимая **условно** точку пересечения кривых расхода, соответствующую минимальной ширине водослива, получают: $h_\phi = 1,25$ м; $q_{\text{сб}} = 78$ м³/с; $b = 30$ м.

По объемной характеристике определяют объем форсировки V_ϕ , соответствующий принятому слою форсировки; затем находят отметку ФПУ и объем водохранилища при ФПУ:

$$V_{\text{ФПУ}} = V_{\text{НПУ}} + V_\phi \quad (7.6)$$

Тогда $V_{\text{ФПУ}} = V_{\text{НПУ}} + V_\phi = 1360 + 140 = 1500$ млн. м³

ФПУ = 133,75 м.

Объем форсировки V_ϕ также можно определить расчетным путем:

при схематизации гидрографа половодья по форме треугольника

$$V_\phi = W_{\text{ПР}} (1 - q_{\max} / Q_{\max}) \quad (7.7)$$

при схематизации гидрографа половодья по форме трапеции

$$V_\phi = W_{\text{ПР}} (1 - \eta q_{\max} / Q_{\max}) \quad (7.8)$$

Таким образом, определенный V_ϕ графическим путем, по объемной характеристике сопоставляется с V_ϕ , полученным по выражениям 7.7, 7.8.

8. Определение высоты плотины с учетом сгонно-нагонных явлений.

Отметку гребня земляной плотины ∇H_{nl} с учетом сгонно-нагонных ветровых явлений определяют по следующему выражению:

$$\nabla H_{nl} = H_{p.cm} + Z_c, \quad (8.1)$$

где $H_{p.cm}$ - расчетный статический уровень, принимаемый равным $\nabla H_{НПУ}$; Z_c - превышение гребня над уровнем, рассчитывается по формуле

$$Z_c = \Delta h + \bar{h}_{н.к} + a, \quad (8.2)$$

где Δh - высота нагона верховой откос плотины, м; $\bar{h}_{н.к}$ - высота наката ветровой волны на верховой откос плотины, м; a - конструктивный запас в зависимости от класса сооружений, согласно СН 2.06.01-86 запас высоты принимается равным:

I класс - $a = 0,5$ м; II класс - $a = 0,3$ м; III класс - $a = 0$.

При отсутствии данных наблюдений высоту ветрового нагона определяют по формуле:

$$\Delta h = 2 \cdot 10^{-6} \frac{U_{10}^2 D}{g \cdot H} \cos \alpha_b, \quad (8.3)$$

где U_{10} - расчетная максимальная скорость ветра на высоте 10 м над уровнем воды, м/с; D - протяженность охваченной ветром акватории водохранилища, м; g - ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; H - глубина водохранилища в расчетной точке (в формуле - разность отметок НПУ и дна), м; α_b - угол между продольной осью водохранилища и направлением ветра, (град) в расчетах принимается $\alpha_b = 0$, где $\cos \alpha_b = 1$.

Высоту наката $h_{нк}$ ветровой волны в глубоководной зоне водохранилища при $1 \leq m \leq 5$ можно вычислить по уточненной формуле Б. А. Пышкина:

$$\bar{h}_{н.к} = \frac{2K_{ш}}{m_b} h_{2л} \sqrt[3]{\frac{\lambda_{2л}}{h_{2л}}}, \quad (8.4)$$

где m_b - коэффициент заложения верхового откоса плотины; $\lambda_{2л}$ - средняя длина ветровой волны в глубоководной зоне, м; $h_{2л}$ - расчетная высота ветровой

волны в глубоководной зоне, м; $K_{ш} = K_{\Delta} \cdot K_{н.н}$ находится по табл. 8.1; K_{Δ} - коэффициент шероховатости; $K_{н.н}$ - коэффициент непроницаемости откоса.

Расчетную высоту ветровой волны принимают равной высоте волны 1 %-й обеспеченности

$$h_{зл} = h_{1\%} = K_{1\%} \cdot \bar{h}_{зл}, \quad (8.5)$$

где $\bar{h}_{зл}$ - средняя высота волны в глубоководной зоне, м; $K_{1\%}$ - коэффициент перехода от средней высоты к волне обеспеченности 1 % можно определить по табл. 8.2 в зависимости от безразмерной величины $\frac{gD}{U_{10}^2}$.

Таблица 8.1. Значения коэффициента шероховатости и непроницаемости креплений откоса

Характеристика крепления откоса	Относительная шероховатость $\Delta/h_{1\%}$	Коэффициент шероховатости K_{Δ}	Коэффициент непроницаемости $K_{н.н}$
Бетонными (железобетонными) плитами	-	1	0,9
Гравийно-галечниковое, каменное или бетонными (железобетонными) блоками	Менее 0,002	1	0,9
	0,005-0,01	0,95	0,85
	0,02	0,90	0,80
	0,05	0,80	0,70
	0,1	0,75	0,60
	Более 0,2	0,70	0,50

Таблица 8.2. Значения коэффициента $K_{1\%}$

$\frac{gD}{U_{10}^2}$	$K_{1\%}$	$\frac{gD}{U_{10}^2}$	$K_{1\%}$
1	2,15	600	2,24
50	2,16	700	2,26
100	2,17	800	2,27
200	2,18	900	2,28
300	2,20	1000	2,30
400	2,22	-	-
500	2,23		

Среднюю высоту ветровой волны в глубоководной зоне $h_{зл}$, а также среднюю длину волны $\lambda_{гл}$ определяют по номограмме (приложение 3).

Последовательность и пример расчета. Исходные данные: $\nabla H_{\text{НПВ}} = 132,6$ м; $H = 116$ м; $m_b = 4$; крепление верхового откоса - бетонные плиты; $U_{10} = 20$ м/с; $D = 4$ км.

1. Расчет высоты ветрового нагона Δh :

$$\Delta h = 2 \cdot 10^{-6} \frac{U_{10}^2 D}{g \cdot H} \cos \alpha_b = 2 \cdot 10^{-6} \frac{20^2 \cdot 4000}{9,81(132,6 - 116)} = 0,02 \text{ м}$$

2. Вычисляют безразмерные величины

$$A = \frac{g \cdot t}{U_{10}} \quad (8.6)$$

где t - продолжительность непрерывного действия ветра, с; при отсутствии данных наблюдений для водохранилищ принимают $t = 6$ ч. Тогда

$$A = \frac{9,81 \cdot 6 \cdot 3600}{20} = 10600$$

$$B = \frac{gD}{U_{10}^2} \quad (8.7)$$

$$B = \frac{9,81 \cdot 4000}{20^2} = 98,1$$

3. По верхней огибающей номограммы (приложение 3) находят для значений A :

$$B_1 = \frac{gh}{U_{10}^2} = 0,09 \text{ и } \Gamma_1 = \frac{g\bar{\tau}}{U_{10}} = 4,3;$$

для значений B :

$$B_2 = \frac{gh}{U_{10}^2} = 0,018 \quad \Gamma_2 = \frac{g\bar{\tau}}{U_{10}} = 1,65.$$

4. Для дальнейших расчетов принимают минимальные значения безразмерных величин:

$$B = \frac{gh}{U_{10}^2} = 0,018 \text{ и } \Gamma = \frac{g\bar{\tau}}{U_{10}} = 1,55.$$

5. По принятым минимальным значениям находят среднюю высоту волны $\bar{h}_{эл}$

$$\bar{h}_{эл} = \frac{BU_{10}^2}{g} \quad (8.9)$$

$$\bar{h}_{эл} = \frac{0,018 \cdot 20^2}{9,81} = 0,73$$

6. Расчетная высота ветровой волны $h_{эл}$, равная высоте волны 1 %-й обеспеченности определяется по выражению (8.5):

Для $\frac{gD}{U_{10}^2} = 98,1$ находят $K_{1\%}$ (по табл. 8.1), откуда $h_{1\%} = 2,17 \cdot 0,73 = 1,58$ м.

7. По принятому минимальному значению $\Gamma = \frac{g\bar{\tau}}{U_{10}}$ находят средний период волны:

$$\bar{\tau} = \frac{\Gamma U_{10}}{g} \quad (8.10)$$

$$\bar{\tau} = \frac{1,55 \cdot 20}{9,81} = 3,16 \text{ с.}$$

8. Среднюю длину волны $\bar{\lambda}_{эл}$ вычисляют по формуле

$$\bar{\lambda}_{эл} = \frac{g\bar{\tau}^2}{2\pi} \quad (8.11)$$

$$\bar{\lambda}_{эл} = \frac{9,81 \cdot 3,16^2}{2 \cdot 3,14} = 15,59 \text{ м.}$$

9. Подставляя в формулу (8.4) найденные значения, получают величину наката $h_{н.к}$ ветровой волны на откос плотины:

$$h_{н.к} = \frac{2 \cdot 0,9}{4} \cdot 1,58 \sqrt{\frac{15,59}{1,58}} = 1,5 \text{ м,}$$

где согласно табл. 8.1 для бетонных плит $K_{ш} = K_{\Delta} \cdot K_{н.п} = 0,9$.

10. Принимая для сооружений III и IV классов капитальности конструктивный запас $a = 0$,

определяют отметку гребня земляной плотины ${}_{\nabla}H_{нл}$:

$${}_{\nabla}H_{нл} = {}_{\nabla}HПУ + \Delta h + h_{н.к} = 132,6 + 0,02 + 1,5 = 134,12 \text{ м.}$$

11. Отсюда высота земляной плотины будет равна

$$H_{нл} = {}_{\nabla}H_{нл} - H = 134,12 - 116 = 18,2 \text{ м.}$$

9. Техничко-экономические показатели регулирования стока.

Общая стоимость водохранилища складывается из стоимости плотины со всеми относящимися к ней сооружениями и затрат, связанных с компенсацией расходов, вызванных подготовкой чаши водохранилища.

Объем $W_{пл}$ тела земляной плотины определяют по формулам:

для параболического профиля речной долины

$$W = 2/3 L_{пл} \cdot H_1 (b + 0.8 m_{\phi} H_1), \text{ м}^3; \quad (9.1)$$

для трапецидального профиля

$$W = 0.5(L_{пл} + \ell) \cdot H_1 (b + K m_{ср} \cdot H_1), \text{ м}^3, \quad (9.2)$$

где $L_{пл}$ - длина плотины по гребню, м; ℓ - длина плотины по низу, м; H_1 - высота плотины ($H_{пл}$), м; b - ширина плотины по гребню, м; $m_{ср}$ - среднее заложение откосов плотины, равное $0,5(m_в + m_н)$; K - коэффициент, определяемый по табл. 9.1.

Таблица 9.1. Значение коэффициента формы русла

$l_{пл} / \alpha_{пл}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
K	0,67	0,73	0,78	0,82	0,86	0,89	0,92	0,94	0,96	0,98	1,0

Из рис. 9.1 следует, что

$$\alpha_{пл} = \ell_{пл} + 2m_{отк} H_{пл}, \quad (9.3)$$

где $m_{отк}$ - заложение откосов.

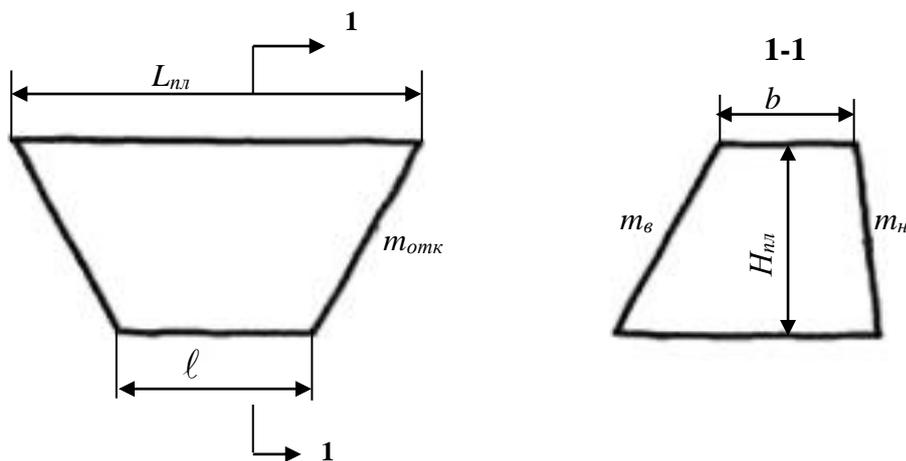


Рис. 9.1. Схема к расчету объема земляной плотины

Стоимость сооружения гидроузла и устройств по регулированию расходов определяют умножением объема плотины на приведенную стоимость $C_{пл}$ 1 м³ тела плотины, тыс. руб.:

$$K_c = C_{пл} W_{пл} \quad (9.4)$$

Расходы, связанные с затоплением и подготовкой чаши водохранилища, находят умножением компенсационных затрат C_k на площадь ω_z затопления территории, км²:

$$K_g = C_k \omega_z \quad (9.5)$$

В работе площадь затопления ω_z условно принимают равной

$$\omega_z = \omega_{нпу} - \omega_{H_{10}}, \quad (9.6)$$

где $\omega_{H_{10}}$ - площадь затопления при уровне воды $H_{10} = H + 10$, т.е. до строительства водохранилища (H – отметка дна водохранилища).

Полная стоимость K равна

$$K = K_c + K_g \quad (9.7)$$

Удельную стоимость водохранилища определяют делением общей его стоимости на величину полезного, а при предварительных расчетах - полного объема воды в водохранилище при заданной глубине наполнения.

Стоимость C_1 руб/м³ кубометра воды полного объема водохранилища находят по следующему выражению:

$$C_1 = \frac{K}{V_{пол}} \quad (9.8)$$

Стоимость C_2 , руб/м³ кубометра воды полезного объема равна

$$C_2 = \frac{K}{V_{плз}} = \frac{K}{V_{мн} + V_{сез}} \quad (9.9)$$

Себестоимость C , руб/м³ подачи кубометра воды из водохранилища определяют как

$$C = \frac{И}{U}, \quad (9.10)$$

где $И$ - ежегодные издержки, руб.; U - объем отдачи за год, м³.

Ориентировочно принимая ежегодные отчисления на амортизацию и эксплуатационные расходы равны 10 % общей стоимости гидроузла, т.е., получим

$$C = \frac{0,1K}{U} \quad (9.11)$$

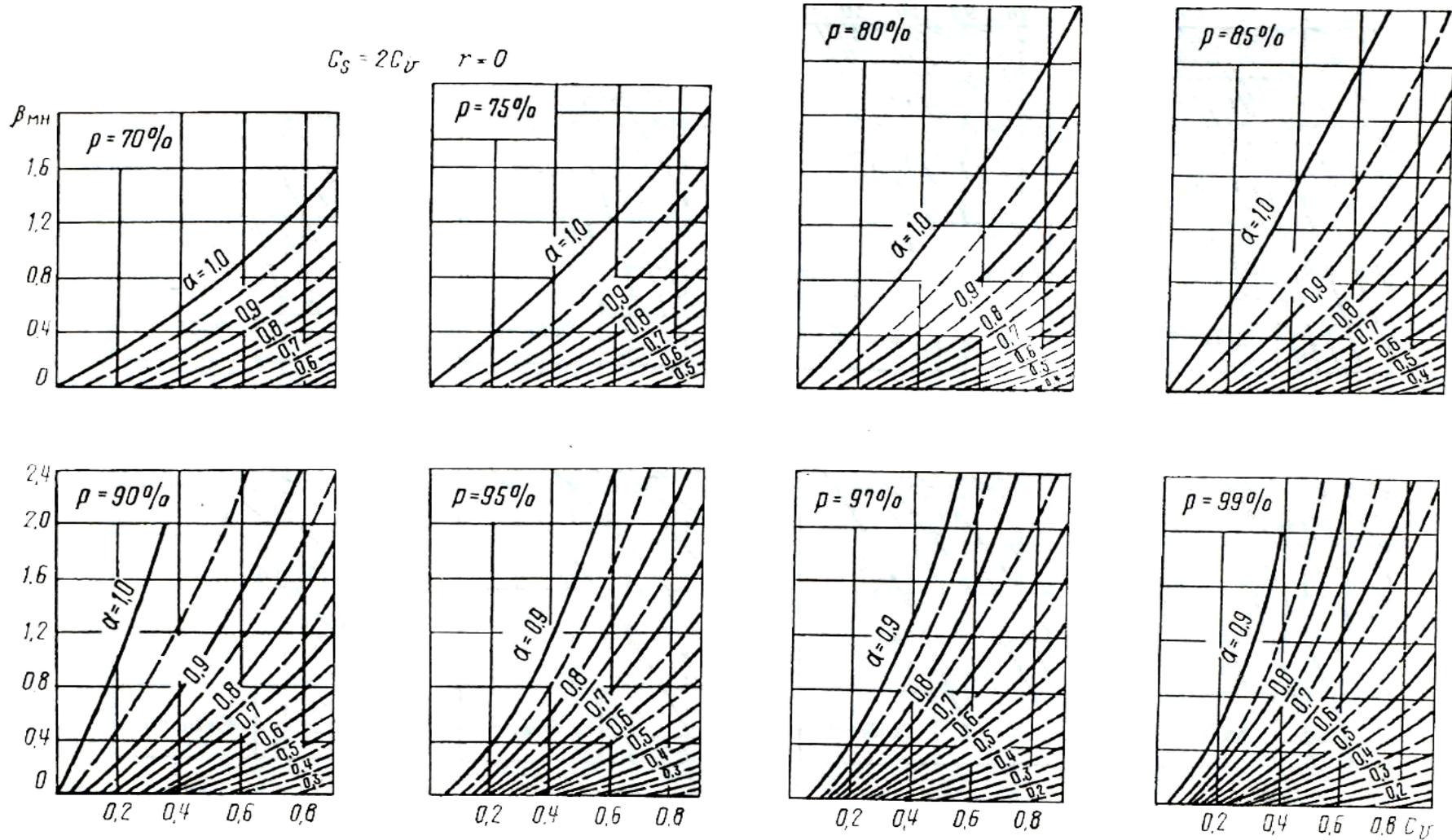
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

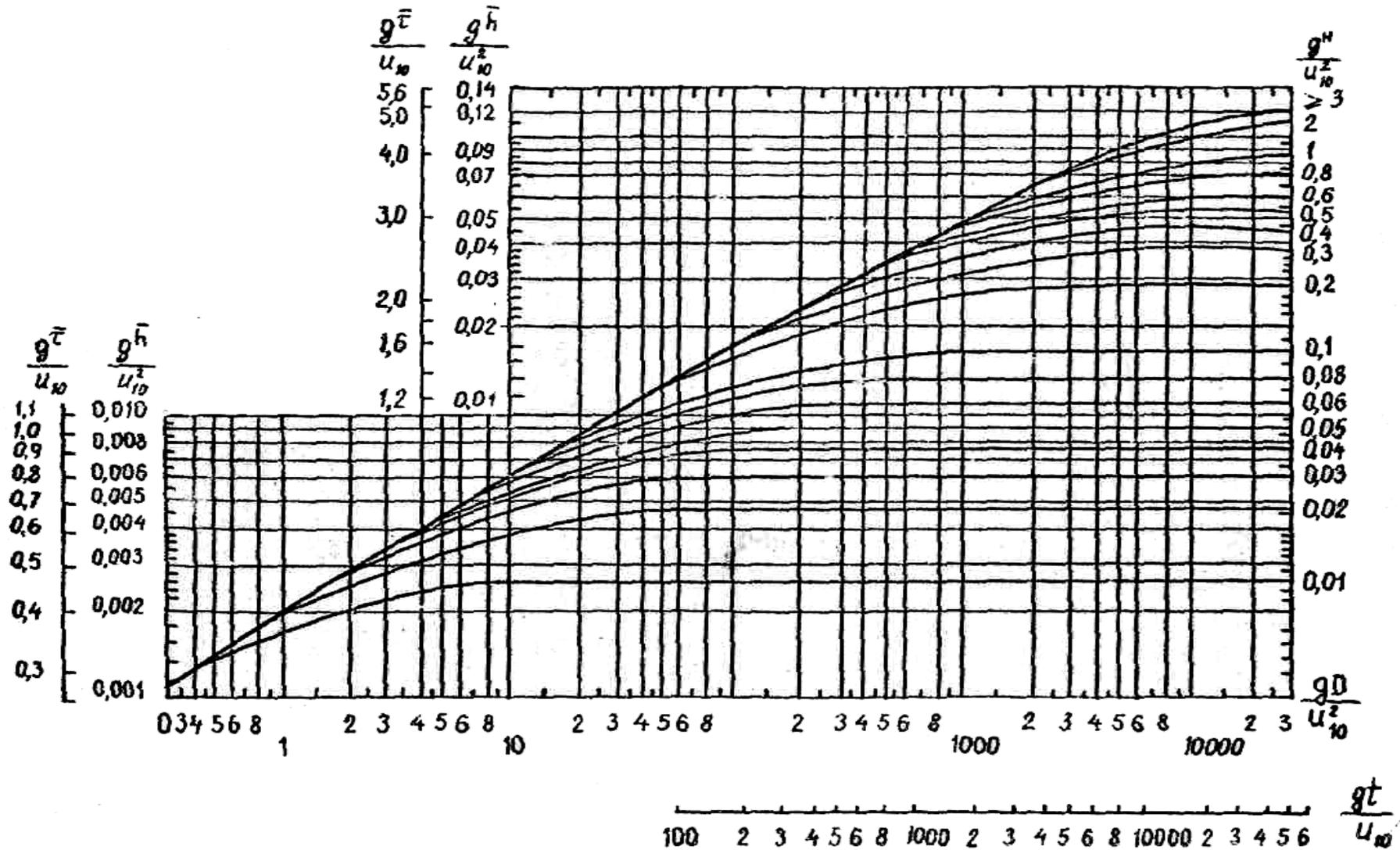
ординаты кривых трёхпараметрического гамма-распределения

P, %	C _v														
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
	C _s =1,5C _v														
0,001	1,47	2,01	2,63	3,30	4,03	4,81	5,64	6,50	7,41	8,39	9,41	10,4	11,5	12,7	13,9
0,01	1,40	1,86	2,38	2,94	3,55	4,19	4,88	5,61	6,38	7,19	8,03	8,92	9,83	10,8	11,8
0,03	1,37	1,79	2,26	2,76	3,30	3,88	4,50	5,14	5,82	6,56	7,33	8,13	8,96	9,80	10,7
0,05	1,35	1,75	2,20	2,68	3,18	3,73	4,31	4,93	5,58	6,26	6,95	7,67	8,43	9,22	10,1
0,1	1,33	1,70	2,11	2,54	3,02	3,52	4,06	4,62	5,22	5,84	6,50	7,18	7,88	8,61	9,38
0,3	1,29	1,61	1,97	2,34	2,74	3,17	3,62	4,10	4,61	5,14	5,72	6,32	6,95	7,60	8,25
0,5	1,27	1,57	1,90	2,24	2,61	3,00	3,41	3,85	4,31	4,80	5,32	5,87	6,44	7,04	7,66
1	1,24	1,51	1,79	2,09	2,42	2,76	3,11	3,49	3,89	4,30	4,74	5,21	5,70	6,24	6,78
3	1,19	1,40	1,62	1,85	2,09	2,34	2,60	2,88	3,16	3,46	3,78	4,12	4,48	4,86	5,27
5	1,17	1,35	1,53	1,72	1,92	2,13	2,34	2,57	2,80	3,03	3,28	3,55	3,83	4,12	4,44
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,68	1,82	1,97	2,11	2,26	2,41	2,56	2,71	2,86	3,00	3,13
20	1,08	1,16	1,25	1,32	1,40	1,47	1,54	1,61	1,67	1,72	1,76	1,80	1,82	1,83	1,83
25	1,07	1,13	1,19	1,25	1,30	1,35	1,39	1,43	1,46	1,48	1,49	1,49	1,48	1,46	1,43
30	1,05	1,10	1,14	1,18	1,21	1,24	1,27	1,28	1,28	1,28	1,26	1,24	1,20	1,16	1,10
40	1,02	1,04	1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,03	0,994	0,952	0,901	0,840	0,766	0,692	0,622
50	0,998	0,990	0,977	0,958	0,934	0,902	0,862	0,814	0,756	0,690	0,618	0,541	0,463	0,388	0,320
60	0,972	0,940	0,903	0,860	0,812	0,757	0,695	0,627	0,553	0,475	0,398	0,324	0,253	0,193	0,142
70	0,946	0,888	0,826	0,760	0,690	0,616	0,538	0,457	0,376	0,298	0,228	0,168	0,118	0,079	0,051
75	0,931	0,860	0,785	0,708	0,630	0,545	0,460	0,377	0,297	0,223	0,161	0,111	0,072	0,045	0,027
80	0,915	0,829	0,741	0,652	0,562	0,472	0,384	0,299	0,223	0,156	0,105	0,067	0,039	0,022	0,012
90	0,874	0,751	0,632	0,518	0,409	0,310	0,222	0,148	0,092	0,053	0,028	0,014	0,006	0,003	0,001
95	0,840	0,689	0,548	0,419	0,305	0,207	0,130	0,074	0,038	0,018	0,008	0,003	0,001	0,3·10 ⁻³	0,2·10 ⁻³
97	0,819	0,651	0,498	0,363	0,247	0,155	0,088	0,045	0,020	0,008	0,003	0,001	0,3·10 ⁻³	0,8·10 ⁻³	0,3·10 ⁻⁴
99	0,780	0,581	0,410	0,268	0,160	0,084	0,038	0,015	0,005	0,001	0,4·10 ⁻³	0,1·10 ⁻³	0,4·10 ⁻⁴	0,8·10 ⁻⁵	0,2·10 ⁻⁵

P, %	C _v										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	C _s =2C _v										
0,001	1	1,49	2,09	2,82	3,68	4,67	5,78	7,03	8,40	9,89	11,5
0,01	1	1,42	1,92	2,52	3,20	3,98	4,85	5,81	6,85	7,98	9,21
0,03	1	1,38	1,83	2,36	2,96	3,64	4,39	5,22	6,11	7,08	8,11
0,05	1	1,36	1,79	2,29	2,85	3,48	4,18	4,95	5,77	6,66	7,60
0,1	1	1,34	1,73	2,19	2,70	3,27	3,87	4,56	5,30	6,08	6,91
0,3	1	1,30	1,64	2,02	2,45	2,91	3,42	3,96	4,55	5,16	5,81
0,5	1	1,28	1,59	1,94	2,32	2,74	3,20	3,68	4,19	4,74	5,30
1	1	1,25	1,52	1,82	2,16	2,51	2,89	3,29	3,71	4,15	4,60
3	1	1,20	1,41	1,64	1,87	2,13	2,39	2,66	2,94	3,21	3,51
5	1	1,17	1,35	1,54	1,74	1,94	2,15	2,36	2,57	2,78	3,00
10	1	1,13	1,26	1,40	1,54	1,67	1,80	1,94	2,06	2,19	2,30
20	1	1,08	1,16	1,24	1,31	1,38	1,44	1,50	1,54	1,58	1,61
25	1	1,06	1,13	1,18	1,23	1,28	1,31	1,34	1,37	1,38	1,39
30	1	1,05	1,09	1,13	1,16	1,19	1,21	1,22	1,22	1,22	1,20
40	1	1,02	1,04	1,05	1,05	1,04	1,03	1,01	0,984	0,955	0,916
50	1	0,997	0,986	0,970	0,948	0,918	0,886	0,846	0,800	0,748	0,693
60	1	0,972	0,938	0,898	0,852	0,803	0,748	0,692	0,632	0,568	0,511
70	1	0,945	0,886	0,823	0,760	0,691	0,622	0,552	0,448	0,424	0,357
75	1	0,931	0,858	0,784	0,708	0,634	0,556	0,489	0,416	0,352	0,288
80	1	0,915	0,830	0,745	0,656	0,574	0,496	0,419	0,352	0,280	0,223
90	1	0,873	0,754	0,640	0,532	0,436	0,352	0,272	0,208	0,154	0,105
95	1	0,842	0,696	0,565	0,448	0,342	0,256	0,181	0,120	0,082	0,051
97	1	0,821	0,660	0,517	0,392	0,288	0,202	0,139	0,088	0,046	0,030
99	1	0,782	0,594	0,436	0,304	0,206	0,130	0,076	0,040	0,019	0,010
99,5	1	0,761	0,560	0,394	0,269	0,166	0,099	0,054	0,027	0,012	0,005
99,7	1	0,748	0,537	0,374	0,240	0,144	0,082	0,042	0,019	0,008	0,003
99,9	1	0,719	0,492	0,319	0,192	0,107	0,052	0,027	0,008	0,004	0,001

Графики зависимости $\beta_{MH} = f(C_V, \alpha, r, P)$ 

Графики для определения элементов ветровых волн в глубоководной и мелководной зонах



УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большакова В. В., Иванов А. И. Сборник задач по гидрометрии, инженерной гидрологии и регулированию стока. М.: Высш. шк., 1975. – 256 с.
2. Воропаев Г.В., Исмайылов Г.Х., Федоров В.М. Проблемы управления водными ресурсами Арало-Каспийского региона. – М.: Наука, 2003. – 427 с.: ил.
3. Грацианский М. Н. Инженерная гидрология и гидрометрия. М.: Высш. шк., 1966. – 215 с.
4. Иванов А. Н., Неговская Т. А. Гидрология и регулирование стока. М.: Колос, 1979. – 384 с.
5. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 392 с.
6. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. – М.: Наука, 1981. – 250 с.
7. Ляпичев Н. Н. Методика регулирования стока и водохозяйственных расчетов. М.: Стройиздат, 1972. – 240 с.
8. Плешков Я. Ф. Регулирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
9. Саваренский А. Д. Регулирование речного стока водохранилищами. М.: Изд-во АН СССР, 1951.
10. СП 33-101-2003 .Определение основных расчетных гидрологических характеристик.: М: 2004. – 72 с.
11. Железняков Г. В., Неговская Т. А., Овчаров Е. Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока. М.: Колос, 1984. – 205 с.
12. Практикум по инженерной гидрологии и регулированию стока/ Под ред. Е. Е. Овчарова. М.: Колос, 1996. – 222 с.
13. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 84 с.
14. Указания по расчету заиления водохранилищ при строительном проектировании. Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 56 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Построение батиграфической и объемной характеристик водохранилища.....	4
2. Определение мертвого объема и срока службы водохранилища	8
3. Расчет потерь воды из водохранилища.....	10
4. Водохозяйственный расчет водохранилища сезонного регулирования стока.....	17
5. Расчет водохранилища сезонного регулирования стока без учета потерь воды графическими способами.....	28
6. Расчет водохранилища многолетнего регулирования стока.....	46
7. Расчет трансформации гидрографа паводка водохранилищем...	52
8. Определение высоты плотины с учетом сгонно-нагонных явлений.....	57
9. Техничко-экономические показатели регулирования стока.....	61
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	63
УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ.....	66
