

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

О.Г. Іваненко, М.В. Захарова

ВОДОГОСПОДАРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

Конспект лекцій

Одеса

«»

2009

ББК 26.22
І 18
УДК 556.048

Друкується за рішенням Вченої ради Одеського державного екологічного університету (протокол № від р.).

Іваненко О.Г., Захарова М.В.

Водогосподарські розрахунки: Конспект лекцій. – Одеса:, 2009. – 117 с.

В конспекті лекцій висвітлені основні положення теорії регулювання річкового стоку. Наведені основні особливості комплексного використання водних ресурсів, способи керування ними у водогосподарському і гідроенергетичному проектуванні та загальноприйнятні методи водогосподарських розрахунків.

Конспект лекцій використовується для студентів гідрометеорологічного напрямку, спеціальність «Гідрологія та гідрохімія» денної та заочної форм навчання.

ЗМІСТ

	Стор
ПЕРЕДМОВА	5
1 ВОДОГОСПОДАРСЬКІ РОЗРАХУНКИ.....	6
1.1 Предмет водогосподарських розрахунків.....	6
1.2 Гідрологічна інформація і способи її використання.....	7
1.3 Топографічні характеристики водосховищ	11
1.4 Гідрогеологічні та інші матеріали	13
2 РОЗРАХУНКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ ПО КАЛЕНДАРНИХ ГІДРОЛОГІЧНИХ РЯДАХ НА ЖОРСТКИЙ ГРАФІК СПОЖИВАННЯ	14
2.1 Види регулювання стоку	14
2.2 Інтегральні криві стоку	21
2.3 Розрахунки регулювання на жорсткий графік споживання.....	26
2.4 Табличний спосіб розрахунків регулювання стоку – розрахунок балансу водосховища.....	35
3 РОЗРАХУНКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ НА ЖОРСТКИЙ ГРАФІК СПОЖИВАННЯ	38
3.1 Основні положення	38
3.2 Перший метод С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля (1930 р.).....	40
3.3 Другий метод С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля (1935 р.)	43
3.4 Врахування корелятивного зв'язку між величинами річного стоку	50
4 РОЗРАХУНКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ ПО КАЛЕНДАРНИХ ГІДРОЛОГІЧНИХ РЯДАХ НА ЗМІННУ ВІДДАЧУ	52
4.1 Основні положення	52
4.2 Схема регулювання на найбільше вирівнювання стоку.....	53
4.3 Диспетчерські графіки	57
5 ВОДНОЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ	64
5.1 Основні положення	64
5.2 Водноенергетичні характеристики ГЕС.....	67
5.3 Основні показники ГЕС	70
5.4 Характеристики турбін	76
5.5 Зміни рівнів, що спричиняються добовим регулюванням	78
6 РЕГУЛЮВАННЯ ПАВОДКОВОГО СТОКУ	80
6.1 Задачі регулювання паводкового стоку	80
6.2 Розрахункові гідрографи	81
6.3 Загальна схема розрахунків регулювання паводкового стоку по статичній ємності водосховища.....	85

6.4 Схеми спрощених розрахунків регулювання паводкового стоку	92
6.5 Розрахунки регулювання паводкового стоку по динамічній ємності водосховища	96
7 КАСКАДНЕ НЕЗАЛЕЖНЕ І КОМПЕНСУЮЧЕ РЕГУЛЮВАННЯ	100
7.1 Каскадне регулювання	100
7.2 Розрахунки каскадного незалежного регулювання по календарних гідрологічних рядах.....	102
7.3 Прийоми узагальнених розрахунків каскадного незалежного регулювання	105
7.4 Компенсуюче регулювання	107
7.5 Розрахунки компенсуючого регулювання по календарних гідрологічних рядах.....	111
ЛІТЕРАТУРА.....	116

ПЕРЕДМОВА

Конспект лекцій складений відповідно до програми дисципліни «Водогосподарські розрахунки», що входить в пакет дисциплін підготовки спеціалістів гідрометеорологічного напрямку.

Навчальна дисципліна «Водогосподарські розрахунки» відноситься до професійно-орієнтованого циклу дисциплін, що завершують підготовку студентів денної та заочної форм навчання з напрямку «Гідрометеорологія», спеціальність «Гідрологія та гідрохімія», шифр 7.070602.

Вона має чіткий практичний напрямок, знайомить студентів з методами використання водних ресурсів і способами керування ними у водогосподарському та гідроенергетичному проектуванні, принципами експлуатації гідротехнічних споруд і водних об'єктів.

Загальний обсяг навчального часу визначається робочим навчальним планом та становить 112 годин.

В результаті вивчення дисципліни студенти повинні знати основні методи ефективного використання водних ресурсів в народному господарстві країни, які пов'язуються з природними умовами, економічною доцільністю та потребами водоохорони.

Після вивчення дисципліни студенти повинні вміти самостійно вирішувати задачі водогосподарського забезпечення різних галузей промисловості та енергетики з використанням сучасних методів оптимізації виробничих процесів.

Головним завданням дисципліни є вивчення основ водного господарства України, основних напрямків використання водних ресурсів, теорії та практичних заходів щодо регулювання річкового стоку.

Вивчення дисципліни «Водогосподарські розрахунки» базується на знаннях, одержаних студентами при вивченні таких дисциплін навчального плану – «Гідрометрія», «Загальна та річкова гідравліка», «Фізична гідрологія», «Гідрологічні розрахунки» та ін.

1 ВОДОГОСПОДАРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

1.1 Предмет водогосподарських розрахунків

Проектування водогосподарських заходів є складним завданням і ведеться в трьох основних напрямках:

а) проектування заходів щодо ефективного використання водних ресурсів;

б) проектування споруд, що забезпечують здійснення цих заходів;

в) проектування заходів, пов'язаних зі шкідливою дією гідротехнічних споруд і водосховищ на існуючий режим водотоків, умови життя і господарство прибережних районів.

Перший з вказаних напрямів проектування складає коло питань, що вирішується водогосподарськими розрахунками.

Під водогосподарськими розрахунками розуміється сукупність розрахунків і проектних опрацювань, що включають такі основні розділи:

1. Виявлення ресурсів і режиму водного об'єкта або району, що планується до використання.

2. З'ясування вимог водоспоживачів і водокористувачів до кількості води і до режиму регулювання. Узгодження цих вимог.

3. Встановлення водогосподарського ефекту, який може бути одержаний від цих заходів.

4. Здійснення розрахунків до вибору основних водогосподарських параметрів, що визначають розміри споруд і водосховищ: величини підпору, ємностей водосховищ, які необхідні для регулювання низького і паводкового стоку, розмірів водоскидних отворів, потужностей гідроелектростанцій та ін.

5. Розробка проектного режиму і складання правил управління роботою водосховищ, що забезпечують реалізацію запланованих заходів.

6. Виконання розрахунків регулювання стоку або водної енергії і складання характеристик режиму роботи установки або каскаду установок.

Водогосподарські розрахунки є дуже важливою частиною проектування водогосподарських заходів і тому вони мають бути виконані дуже ретельно. Необхідно, перш за все, всебічно вивчити режим водотоку і врахувати вплив на цей режим існуючого використання.

Необхідно також правильно оцінювати потреби у воді з боку всіх галузей народного господарства, задовольнити запити яких покликані проектувані заходи, виявити вимоги до регулювання низького і паводкового стоку та ін.

Зіставленням природного режиму стоку з запланованим режимом його використання визначається характер і масштаби необхідного

регулювання низького стоку з метою пристосування його до потреб народного господарства, характер і масштаби регулювання паводкового стоку. Потім виконуються скорочені розрахунки для вибору основних водогосподарських параметрів, що визначають розміри споруди водосховищ, і, нарешті, виконуються докладні розрахунки при обраних параметрах. Вказані докладні розрахунки, метою яких є здобуття характеристик режиму роботи установки або каскаду установок, ведуться на основі спеціальних правил, що зазвичай розробляються стосовно обраних параметрів споруд і водосховищ.

Створення водосховища спричиняє також шкідливі наслідки. Так, затопляються і підтоплюються землі, населені пункти і промислові підприємства, відбуваються деформації русел і берегів, зменшуються швидкості течії, що спричиняє випадання наносів і замулювання водосховищ; у нижніх б'єфах при цьому під впливом великих швидкостей і підвищеної транспортуючої здатності освітленого потоку відбуваються розмиви русла. Під впливом підпору і регулювання змінюється режим витрат і рівнів у верхньому і нижньому б'єфах споруд. У зоні водосховищ і в нижніх б'єфах відбуваються зміни зимового, термічного, льодового режиму та ін.

Прогноз згаданих змін режиму водотоку та оцінка впливу його на умови життя і господарство прибережних районів є задачею низки дисциплін, суміжних із водогосподарськими розрахунками.

1.2 Гідрологічна інформація і способи її використання

Річковий стік служить ресурсами водогосподарської установки, тому для правильного проектування, будівництва і експлуатації установки необхідно виконати оцінку стоку на період майбутньої її роботи. Ця оцінка повинна враховувати всі варіанти режиму водотоку і особливо ті його елементи, які визначають основні розміри і режим експлуатації установки. Так, якщо в задачу входить забезпечення споживачів певною кількістю води, необхідно знати характер можливого в майбутньому маловоддя, його тривалість, ступінь зменшення стоку та ін. Для визначення розмірів водоскидних пристроїв, через які пропускатимуться в нижній б'єф надлишки витрат при проходженні по річці водопіль і паводків, слід передбачити можливі в майбутньому величини максимального стоку.

Гідрологічна інформація, що надходить від опорної гідрологічної мережі, складає основу гідрологічних розрахунків при водогосподарському проектуванні. Якість розрахунків залежить від наявності і точності гідрологічних даних. Проектування будь-якого водогосподарського заходу починається з аналізу надійності і однорідності даних наявної мережі, із здійснення спеціальних гідрологічних досліджень

для збору даних за проектом. Дані спостережень за стоком можна виразити у вигляді таблиці середьїнтервальних витрат води, що має такий вигляд (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Середньомісячні і середньорічні витрати води річки..... у створі....., м³/с

Водогос-подарський рік	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	Середні річні витрати води
1912-13	145	1061	203	85	121	108	212	91	50	45	47	51	185
1913-14	431	1028	105	68	41	38	41	39	39	42	43	53	164
1914-15	222	728	94	97	266	130	193	111	68	60	56	55	173
...
...
...
Серед.	200	1320	502	195	149	167	279	206	109	77	65	64	278
Максим.	906	2302	1158	564	570	641	1047	726	213	163	149	97	424
Мінім.	36	553	94	67	41	38	41	39	39	42	43	36	164

Проектні водогосподарські розрахунки доцільно виконувати в залежності від вирішуваних задач і наявності початкової інформації по декадних (у водопілля або за період відкритого русла) і місячних (у межень) інтервалах часу. В цьому випадку в табл. 1.1 вводяться додаткові графи.

Виконання розрахунків тільки по місячних інтервалах дає задовільні результати лише для ГЕС з водосховищами річного і багаторічного регулювання стоку. Застосування добових інтервалів виправдано лише для ГЕС з водосховищами добового регулювання з низьким коефіцієнтом використання стоку. Використання розрахункових інтервалів більших за місяць призводить до істотного завищення розрахункової водо- або енерговіддачі. При цьому зазвичай використовується не календарний рік з січня по грудень, а водогосподарський (як правило, з початку водопілля до кінця межені). Практичний сенс такого року полягає в тому, що в його межах замикається визначений етап роботи водосховища: наповнення-спрацювання. Межа водогосподарського року поєднується, як правило, з початком першого місяця водопілля. Хоча від року до року час настання водопілля календарно не співпадає, межу року слід жорстко закріплювати, орієнтуючи її на більш ранній початок водопілля. У зв'язку з різноманітністю кліматичних умов використовувани водогосподарські роки мають різні межі: з березня по лютий, з квітня по березень, з травня по

квітень та ін.

Цей стоковий ряд спостережень за багаторічний період можна розглядати як статистичну вибірку з генеральної сукупності, що описує природні процеси. Основними характеристиками, які використовуються (серед інших) при водогосподарському проектуванні, є:

- середній багаторічний річний стік (\bar{Q}_p або \bar{W}_p);
- розподіл стоку протягом року (по сезонах, окремих періодах, протягом місяця, доби);
- максимальні витрати води:
 - а) сформовані весняним сніготаненням (максимуми весняного водопілля);
 - б) сформовані зливовими опадами (максимуми дощових паводків);
 - в) сформовані в результаті обох факторів (весняне сніготанення і зливові опади);
 - г) різної забезпеченості;
 - об'єм стоку весняного водопілля і дощових паводків;
 - мінімальні витрати;
 - середньорічна витрата завислих і донних наносів;
 - розподіл витрат завислих і донних наносів впродовж року;
 - тривалість періодів з льодовими явищами, наприклад, періодів з льодовим покривом і льодоходу.

Ці характеристики встановлюються по багаторічних рядах спостережень. Для застосування стандартних статистичних методів дані необхідно перевірити на стаціонарність і однорідність відомими методами математичної статистики.

Аналіз існуючих методів розрахунку регулювання стоку дозволяє поділити їх на три основні групи за відношенням до використання ряду гідрологічних спостережень річкового стоку за минулий період:

1. Календарні методи. Виконання розрахунків безпосередньо по календарних природних, не змінених людською діяльністю, гідрологічних рядах з подальшою статистичною обробкою їхніх результатів.

Цей спосіб найбільш поширений в проектній практиці. У ньому передбачається, що використовувані для розрахунку дані минулих років спостережень відбивають всі складні закономірності процесу стоку в майбутньому.

Його перевагою є наочність, універсальність в області застосування, що дуже важливо при розробці планів експлуатації водосховищ і компенсуючого регулювання віддачі в складних водогосподарських системах. Проте невелика довжина ряду спостережень за стоком інколи призводить до значних похибок при визначенні тих або інших водогосподарських параметрів.

2. Імовірнісні методи. Виконання розрахунків регулювання стоку по статистичних параметрах кривих забезпеченості об'ємів річного стоку

$(\bar{Q}_p$ або $\bar{W}_p, C_{v_p}, C_{s_p}$), що одержані шляхом попередньої обробки початкових рядів стоку.

Імовірнісні методи дозволяють теоретично оцінити імовірності різних чергувань водності річок. В результаті виключається можлива помилка в оцінці регулюючої здатності водосховищ при розрахунках по коротких гідрологічних рядах.

3. Метод математичного моделювання або метод статистичних випробувань (Монте-Карло). Основна ідея цього методу полягає в створенні математичної моделі процесу річкового стоку. Метод має спільне з двома вищепереліченими способами використання гідрологічних даних у виконуваних водогосподарських розрахунках. Спільним з першим є те, що тут водогосподарські розрахунки виконуються безпосередньо по гідрологічному ряду, який, на відміну від спостереженого, створений шляхом моделювання процесу стоку. Ця реалізація досягається через встановлення статистичних параметрів, тобто функції розподілу імовірності стоку. В цьому полягає спільне з другим способом. Статистичні випробування доповнюють спостережений ряд, який є одним з варіантів чергування маловодних та багатоводних років і сезонів, численними іншими варіантами поєднань років різної водності, що має величезне значення для правильного вирішення задач багаторічного регулювання стоку.

Прийняття того або іншого методу за основу обумовлюється тривалістю наявного гідрологічного ряду і запланованим ступенем регулювання стоку, який визначає тривалість циклів спрацювання і наповнення водосховища.

При сезонному регулюванні стоку, коли цикл роботи водосховищ замикається в межах кожного року, обґрунтування параметрів водосховищ, побудова диспетчерських правил управління режимом їхньої роботи і оцінка гарантованих і середніх багаторічних значень віддачі водосховищ практично завжди з необхідною точністю може бути виконана безпосередньо по ряду спостережень, якщо його довжина складає не менше 25-30 років (перший спосіб). В цих випадках статистичні методи застосовуються лише для одержання екстремальних значень стоку, що не зафіксовані спостереженнями.

Достатньо складним випадком є проектування водосховища багаторічного регулювання стоку, при якому цикл його наповнення і спрацювання вимірюється декількома роками.

Тому для розрахунків багаторічного регулювання стоку по календарному гідрологічному ряду необхідно, щоб ряд був тривалим і включав угруповання маловодних років, які дають критичне спрацювання заданого об'єму водосховища.

Оскільки на практиці зазвичай доводиться мати справу з

гідрологічними рядами обмеженої тривалості, то за основу розрахунків багаторічного регулювання приймається другий або третій спосіб, тобто з використанням кривих розподілу імовірності стоку або безпосередніх гідрологічних рядів, змодельованих за допомогою методу Монте-Карло.

Спостережені гідрологічні ряди в цьому випадку використовуються для одержання характеристик режиму регулювання і при розробці правил управління роботою водосховищ.

1.3 Топографічні характеристики водосховищ

Основними топографічними характеристиками водосховища є криві залежності площ дзеркала (F) і об'ємів (V) від підпірного рівня (наповнення водосховища). Для розрахунку цих характеристик необхідно мати, як правило, топографічні карти з масштабами 1:25 000 або 1:10 000.

Площі дзеркала водосховища при тих або інших положеннях підпірного рівня визначаються шляхом планіметрування на картах площ, обмежених контурами горизонталей і лінією повздожньої осі підпірної споруди, що замикає горизонталі з обох берегів. Для побудови залежності площ дзеркала від рівнів необхідно виконати планіметрування на картах площ при всіх горизонталях в межах від початкового рівня Z_0 (уріза води) до можливого підпірного рівня – Z_n .

Нехай в межах запланованого підпору – до Z_n одержано низку значень площ дзеркала F_1, F_2, \dots, F_n . Сполучаючи ці точки прямою, можна побудувати залежність $F = f(Z)$. Ординати кривої $V = f(Z)$ для будь-якої відмітки Z розраховуються шляхом послідовного підсумовування від Z_0 елементарних об'ємів ΔV_i , що визначаються за виразом:

$$\Delta V_i = \frac{1}{3} (F_i + \sqrt{F_i F_{i+1}} + F_{i+1}) \Delta Z \quad (1.1)$$

або при малому ΔZ

$$\Delta V_i = \frac{1}{2} (F_i + F_{i+1}) \Delta Z, \quad (1.2)$$

де ΔV_i – елементарний об'єм водосховища між горизонталями Z_i і Z_{i+1} , км³;

F_i і F_{i+1} – площі дзеркала водосховища відповідно при рівнях Z_i і Z_{i+1} , км²; $\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i$.

Розрахунок топографічних характеристик водосховища зручно вести

за формою табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Підрахунок топографічних характеристик водосховища

Рівень води Z , м	Площа дзеркала води F , км ²	$\frac{F_i + F_{i+1}}{2}$, км ²	$\frac{F_i + \sqrt{F_i F_{i+1}} + F_{i+1}}{3}$, км ²	Висота шару води ΔZ , м	Об'єм шару води ΔV_i , км ³	Об'єм вдсх, $V = \sum \Delta V_i$, км ³
1	2	3	4	5	6	7
15	175	375	356	5	1,78	0
20	575					1,78
25	1260	918	895	5	4,48	6,26
		1820	1790	5	8,95	15,21
30	2380	2900	2880	5	14,4	29,61
35	3420	4110	4090	5	20,4	50,01
40	4800	5720	5700	5	28,5	78,51
45	6640	7970	7930	5	39,6	118,1
50	9300	10550	10530	5	52,6	170,1
55	11800					

З табл. 1.2 видно, що середні площі, підраховані за наведеними виразами, при невеликому кроці по висоті відрізняються мало. Об'єми водосховища в таблиці підраховані за формулою (1.1). За формулою (1.2) повний об'єм водосховища при рівні 55 м склав 171,8 км³, тобто різниця склала близько 1,0 %.

За даними таблиці будуються залежності $F = f(Z)$ і $V = f(Z)$. Форма кривої $F = f(Z)$ визначається конфігурацією долини і може мати неправильний контур. Залежність $V = f(Z)$ виражається плавною опуклою кривою параболічного типу.

Оскільки крива $V = f(Z)$ розрахована для умов горизонтальності рівня водосховища, тобто відповідає гідростатичній рівновазі нерухомої рідини, вона носить назву **статистичної кривої об'ємів водосховища**.

Для неглибоких і протяжних водосховищ середнього і невеликого об'єму не горизонтальність їхньої водної поверхні дуже значна. В цьому випадку розрахунки необхідно виконувати по **динамічних кривих**

об'ємів.

1.4 Гідрогеологічні та інші матеріали

З точки зору безпосереднього водогосподарського проектування геологічні і гідрогеологічні матеріали необхідні головним чином для встановлення втрат фільтрації з водосховищ в процесі їхньої нормальної експлуатації, а також для оцінки витрат на насичення ґрунтів ложа і бортів водосховища при первинному наповненні до рівня мертвого об'єму і в межах корисного об'єму. Для вирішення цих задач польовими дослідженнями повинна бути встановлена геологічна будова долини, одержані дані про шпаруватість складаючих її гірських порід, про планово-висотне положення існуючого дзеркала ґрунтових вод. Для спостереження за зміною рівня ґрунтових вод при первинному наповненні і в процесі нормальної експлуатації водосховища доцільно мати мережу гідрогеологічних створів, що дозволить в сукупності з іншими згаданими даними визначити об'єми води, які постійно і тимчасово акумулюються в товщі ґрунтів прибережної смуги водосховища. Геологічні і гідрогеологічні дані необхідні і при розрахунках процесів переробки берегів водосховищ і руслових процесів нижче за гідровузол.

Для водогосподарського проектування необхідні також дані метеорологічних спостережень, дані досліджень руслових процесів, відомості про господарську діяльність на водозборі і в руслі річки, відомості про водокористування в сучасних умовах і на перспективу. Відомості про опади використовуються для відновлення пропуску в рядах даних за стоком, для екстремальних витрат води на підставі відомостей про максимальні інтенсивності дощового стоку. Велику цінність являють собою дані по випаровуванню, вологості повітря і швидкості вітру, які використовуються для розрахунків втрат на випаровування при створенні водосховищ, а також висоти хвилі на водосховищах.

При розрахунках тимчасових втрат на льодоутворення в зимовий період необхідні відомості про висоту сніжного покриву і товщину льоду на водосховищах. Необхідна і інформація про водоспоживання. Вона надзвичайно різноманітна і в загальному випадку за формою задача може бути підрозділена на дві великі категорії:

1) інформація задана у вигляді постійного об'єму, що не змінюється від року до року, з його розподілом по розрахункових інтервалах усередині року;

2) інформація, що змінюється від року до року в залежності від певних гідрологічних, метеорологічних та інших характеристик конкретного року.

До інформації першої категорії відносяться, в першу чергу

промислове і господарсько-питне водоспоживання, а також обов'язкові санітарні попуски в нижні б'єфи гідровузлів. Ці водоспоживачі мають високий норматив забезпеченості (>90 %) і його обмеження допускається тільки в екстремально маловодних умовах і при порожньому водосховищі; у цих умовах для підтримки водоподачі в мінімально допустимому об'ємі інколи дозволяється спрацювання водосховища нижче РМО до так званого рівня гранично допустимого спрацювання.

До другої категорії відноситься водоспоживання зрошувального землеробства і екологічні попуски у нижні б'єфи. Особливістю зрошувального водоспоживання вважається те, що зрошувальна норма істотно змінюється в залежності від метеорологічних умов конкретного року. Ці зміни носять випадковий характер і тому в загальному випадку повинні бути описані так само, як і стік, за допомогою кривої забезпеченості. У практиці проектування зазвичай користуються ступінчастою апроксимацією вказаної кривої з кількістю ступенів не більше п'яти. Таким чином можна виділити п'ять градацій року за метеорологічними умовами: дуже посушливі, посушливі, середні, вологі, дуже вологі.

Питання для самоперевірки

1. Які вимоги ставляться до повноти і якості початкових гідрологічних матеріалів?
2. У чому сенс водогосподарського розрізання року?
3. Як ведеться підготовка початкових гідрологічних даних при використанні природної водойми (озера) під водосховище?
4. Назвіть способи використання даних гідрологічних спостережень у водогосподарських розрахунках. Перелічіть їхні переваги і недоліки.
5. Які топографічні матеріали необхідні для водогосподарських розрахунків і в чому полягає їхня обробка?
6. Які інші початкові матеріали також необхідні для цих розрахунків і як вони використовуються в проектах водного господарства?

2 РОЗРАХУНКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ ПО КАЛЕНДАРНИХ ГІДРОЛОГІЧНИХ РЯДАХ НА ЖОРСТКИЙ ГРАФІК СПОЖИВАННЯ

2.1 Види регулювання стоку

Розрізняють такі види регулювання: **добове, тижневе, сезонне, багаторічне**. Крім того, в практиці водогосподарського використання

зустрічається **неперіодичне** регулювання.

Добове регулювання полягає в перерозподілі впродовж доби рівномірного стоку річки (Q) у відповідності з нерівномірним споживанням води. Вода в години малого споживання накопичується у водосховищі, а витрачається в години підвищеного споживання.

Призначення добового регулювання дуже різноманітне.

По-перше, при недостатчі води в джерелі добове регулювання дозволяє збільшити число споживаючих одиниць. Нехай $q_{\text{макс}}$ – максимальна ордината графіка добового споживання води, віднесеного до споживаючої одиниці, а $q_{\text{сер}}$ – середня ордината того ж графіка (рис. 2.1).

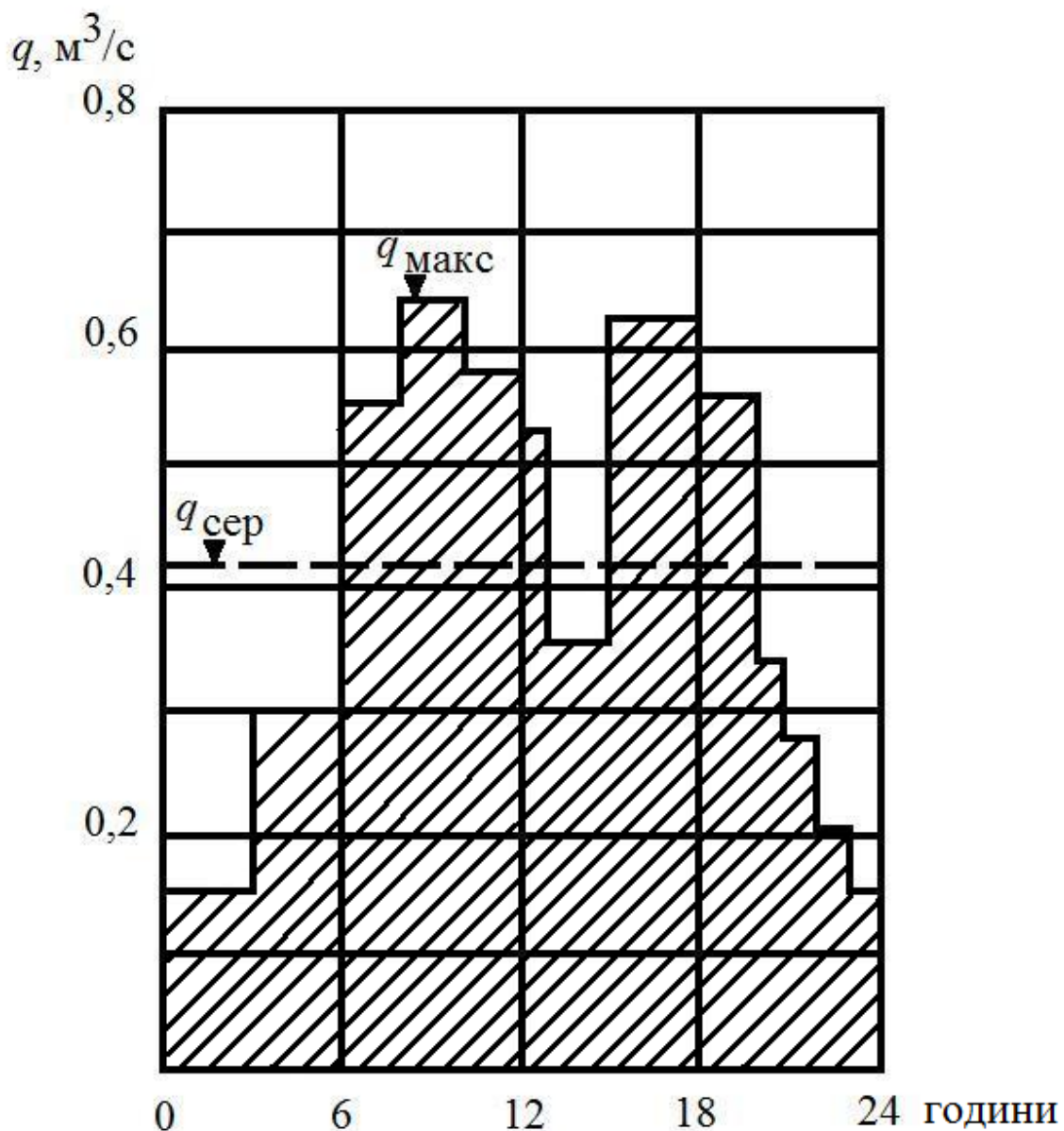


Рис. 2.1 – Графік добового споживання води

Тоді кількість споживаючих одиниць S буде дорівнювати:
за відсутності добового регулювання

$$S_1 = \frac{Q}{q_{\max}}, \quad (2.1)$$

за наявності добового регулювання

$$S_2 = \frac{Q}{q_{\text{сер}}}, \quad (2.2)$$

Тобто виходить, що добове регулювання у стільки разів збільшує кількість споживаючих одиниць, у скільки q_{\max} більше за $q_{\text{сер}}$, тобто

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{Q}{q_{\text{сер}}} : \frac{Q}{q_{\max}} = \frac{q_{\max}}{q_{\text{сер}}}. \quad (2.3)$$

По-друге, добове регулювання дозволяє зменшити пропускну здатність насосних споруд, що підводять воду. Велике значення добове регулювання має для підвищення використання потужності гідроелектричних станцій.

Тижневе регулювання полягає в перерозподілі впродовж тижня (декади і так далі) рівномірного стоку у відповідності з нерівномірним споживанням води. Цей вид регулювання здійснюється в тих випадках, коли у водоспоживачів є загальний вихідний день, в який використовується менше води, ніж в робочі дні.

Якщо добове споживання води в робочі дні q_1 , в неробочий день q_2 , то при тривалості тижня (декади) n днів загальне споживання води за тиждень складатиме (рис. 2.2)

$$q_1(n-1) + q_2, \quad (2.4)$$

а середня величина споживання води буде дорівнювати

$$q_{\text{сер}} = \frac{q_1(n-1) + q_2}{n}. \quad (2.5)$$

Тобто перевищення об'ємів споживання води над рівномірним стоком в робочі дні

$$V_1 = (q_1 - q_{сер})(n - 1) \quad (2.6)$$

відповідає надлишку її в неробочий день

$$V_2 = q_{сер} - q_2, \quad (2.7)$$

тобто має місце рівність

$$V_1 = V_2 = V. \quad (2.8)$$

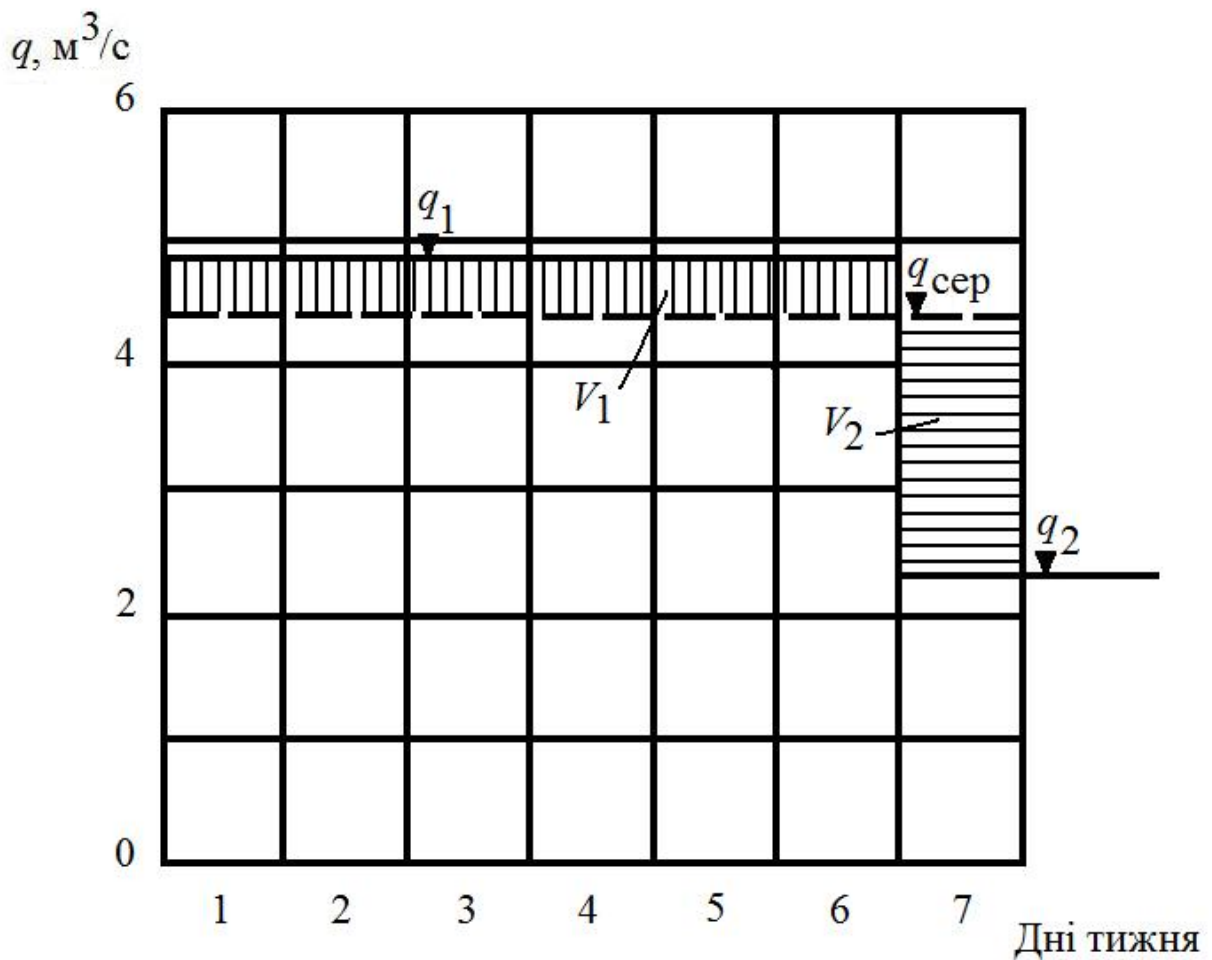


Рис. 2.2 – Графік тижневого споживання води

Величиною V визначається ємність водосховища, що необхідна для здійснення тижневого регулювання. Підставивши у вираз (2.6) замість $q_{сер}$ його значення з (2.5), одержимо формулу для обчислення необхідної ємності водосховища

$$V = (q_1 - q_2) \frac{n-1}{n}. \quad (2.9)$$

Сезонне регулювання полягає в перерозподілі стоку з багатоводних сезонів року в маловодні. Воно обумовлюється внутрішньорічною нерівномірністю стоку і неспівпадінням цього стоку в часі зі споживанням води. Це найбільш поширений вид регулювання.

Сутність сезонного регулювання пояснюється рис. 2.3, на якому зображені гідрографи природного за розрахунковий маловодний рік і зарегульованого стоку, тобто споживання води. Останній наводиться для найбільш простого випадку сезонного регулювання, коли використовується витрата не змінюється впродовж року, тобто регулювання ведеться на постійну витрату.

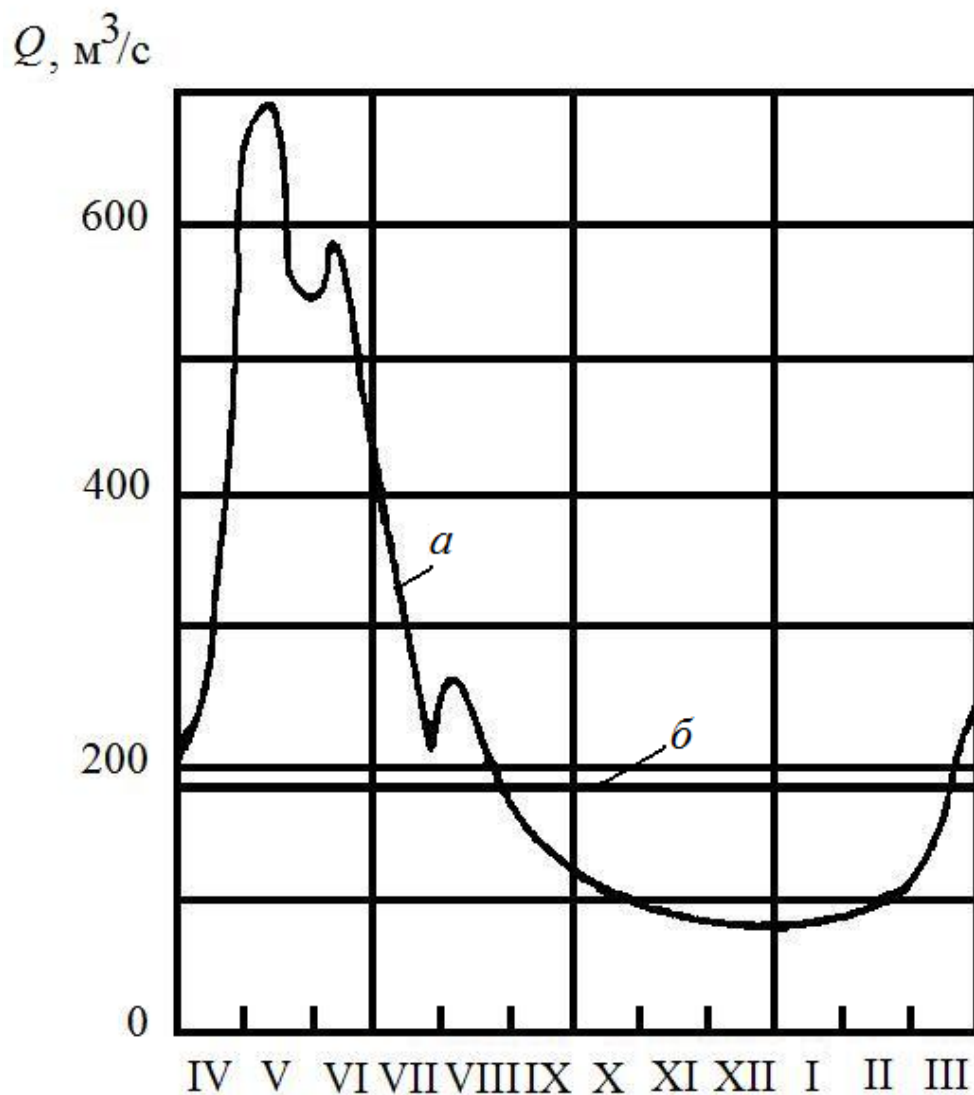


Рис. 2.3 – Графік природних (а) і зарегульованих (б) витрат при сезонному регулюванні

У період надлишків стоку над споживанням водосховище наповнюється, а в період недостачі – спрацьовується. Величина необхідної ємності водосховища для здійснення сезонного регулювання визначається дефіцитом стоку, який чисельно дорівнює площі на гідрографі, що обмежена лінією зарегульованої витрати і гідрографом в тій його частині, де приплив менший за споживання. Надлишки (частина гідрографа над лінією зарегульованої витрати) і недостачі (дефіцит) балансуються лише в тому випадку, коли регулювання доведено до повного річного, тобто коли зарегульована витрата дорівнює середній витраті розрахункового маловодного року. Коли зарегульована витрата менша ніж середня витрата маловодного року, надлишки перевищують дефіцит, і частина стоку після наповнення водосховища скидається.

Наведений приклад є найбільш простим випадком роботи водосховища, коли воно впродовж водогосподарського року по одному разу наповнюється і спрацьовується. При складному гідрографі припливу (за наявності літньо-осінніх паводків) водосховище працюватиме в два такти і більше.

По відношенню між величинами зарегульованої витрати і середньої витрати розрахункового маловодного року можна судити про глибину сезонного регулювання. Коли зарегульована витрата наближається до середньої річної або дорівнює їй, то регулювання називається **глибоким сезонним**. При малих величинах зарегульованих витрат по відношенню до середньої витрати розрахункового маловодного року сезонне регулювання може бути назване **неглибоким**.

Багаторічне регулювання є найбільш досконалим. Воно полягає в перерозподілі стоку з багатоводних років і періодів в маловодні (рис. 2.4). Основною ознакою багаторічного регулювання є перевищення зарегульованого річного стоку над стоком розрахункового маловодного року, а при більш глибокому регулюванні – перевищення зарегульованого стоку за n років над стоком розрахункового маловодного періоду тієї ж тривалості. Дефіцит за n -річчя (рис. 2.4) покривається з багаторічних запасів води, що створюються у водосховищі за попередній маловоддю багатоводний період.

Якщо при сезонному регулюванні цикл роботи водосховища наповнення-спрацювання замикається в межах одного року, то при багаторічному регулюванні цей цикл триває декілька років. Чим більшою є глибина регулювання, тобто чим ближча зарегульована витрата до середньобогаторічної річної витрати води, тим довшим є період спрацьовування і наповнення водосховища. В порівнянні з іншими видами регулювання для здійснення багаторічного регулювання необхідні великі розміри корисної ємності водосховища, оскільки окрім ємності, необхідної для вирівнювання багаторічних коливань стоку, необхідна також ємність і

для внутрішньорічного його вирівнювання. Необхідна ємність водосховища при багаторічному регулюванні різко зростає із збільшенням глибини регулювання.

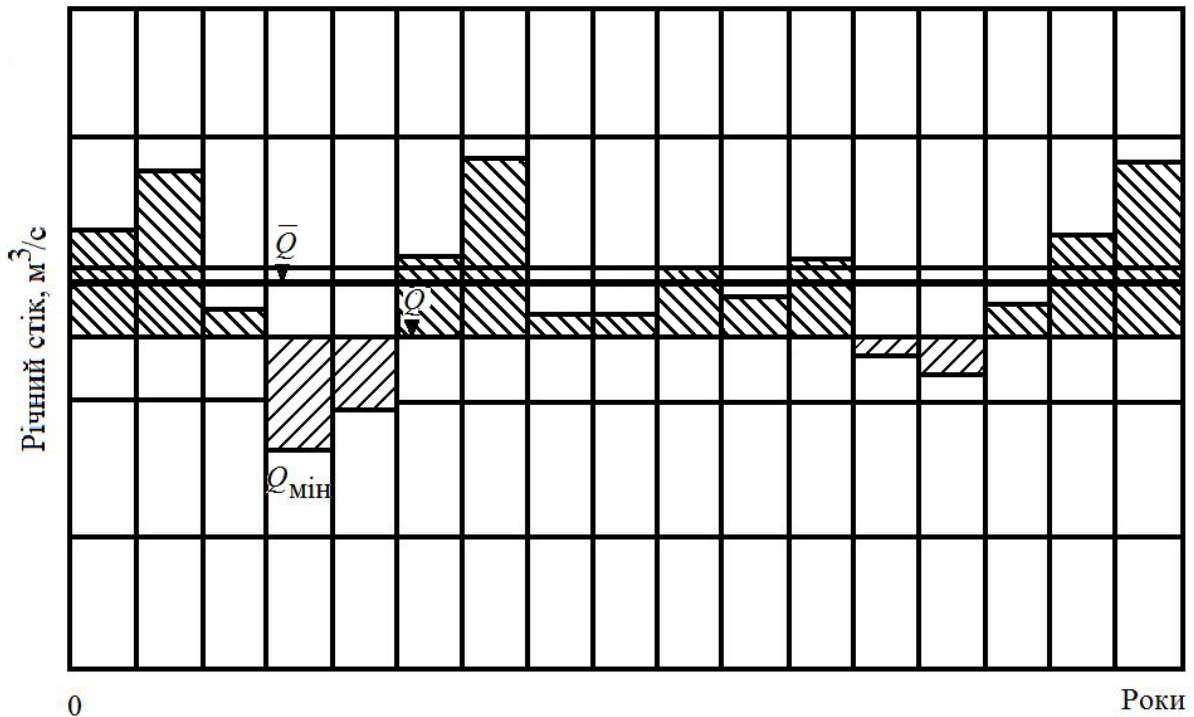


Рис. 2.4 – Графік річного стоку

Теоретичною межею багаторічного регулювання є повне вирівнювання стоку до середньої багаторічної річної витрати \bar{Q} .

Неперіодичне регулювання відрізняється від попередніх тим, що воно не має точно закріпленого графіка роботи. Спрацювання і наповнення водосховища здійснюються за потребою і можливістю. Цей вид регулювання застосовується переважно в лісосплаві і в спеціальних випадках на водному транспорті, а також в санітарних, сільськогосподарських і рибогосподарських цілях.

У лісосплаві неперіодичне регулювання застосовується разом із добовим і сезонним. На відміну від сезонного, при якому сплавні умови забезпечуються цілодобово протягом всього періоду регулювання, при неперіодичному (як і при добовому) регулюванні необхідні для лісосплаву умови створюються протягом декількох годин, поки дається зосереджений попуск з водосховища; накопичення ж водосховища (на відміну від добового регулювання) відбувається протягом низки діб.

У водному транспорті неперіодичне регулювання застосовується при необхідності зосередженими попусками підвищити на деякий час судноплавні глибини на перекатах. У санітарних цілях короткочасними

зосередженими попусками користуються для тимчасового затоплення ділянок річки, заражених личинками малярійного комара, з метою боротьби з осередками малярії. У сільському господарстві тимчасовими попусками користуються для затоплення заплавлених лугових угідь і при лиманному зрошуванні, а в рибному господарстві – для підвищення глибин в місцях нерестовищ.

2.2 Інтегральні криві стоку

При розрахунках об'ємів водосховища доводиться оперувати об'ємами стоку за різні періоди часу. Тому зручно уявляти графіки коливання стоку в сумарному, інтегральному вигляді.

На гідрографі стоку (рис. 2.5 а) виділимо елементарну смужку з основою dt . Площею цієї смужки визначиться об'єм стоку dW за інтервал часу dt

$$dW = Qdt. \quad (2.10)$$

Площею всього гідрографа визначиться сумарний об'єм стоку W за період t . Аналітично площу гідрографа можна виразити інтегралом

$$W = \int_0^t Qdt. \quad (2.11)$$

Якщо послідовно обчислювати величини стоку W_1, W_2, \dots відповідно за інтервали часу $0 - t_1, 0 - t_2, \dots$ і відкласти їх в будь-якому масштабі на осі ординат (рис. 2.5 б), одержиться крива, що характеризує зміну сумарного стоку за період t . Ця крива носить назву **інтегральної кривої стоку**.

Для обчислення ординат інтегральної кривої за виразом (2.11) необхідно було б виконати велику роботу пов'язану з підбором рівнянь гідрографа. Однак, практично достатньо вести розрахунок за кінцевими різницями. Тоді вирази для визначення стоку набудуть наступного вигляду:

за інтервал часу dt

$$\Delta W = Q\Delta t, \quad (2.12)$$

сумарного стоку

$$W = \sum_0^t Q \Delta t, \quad (2.13)$$

Тому інтегральну криву називають часто **сумарною кривою стоку**.
 При рівних інтервалах Δt , на які буде розбитий період t , вираз (2.13) набуде наступного вигляду

$$W = \Delta t \sum_0^t Q, \quad (2.14)$$

де Q – середні витрати в інтервалах часу Δt , м³/с.

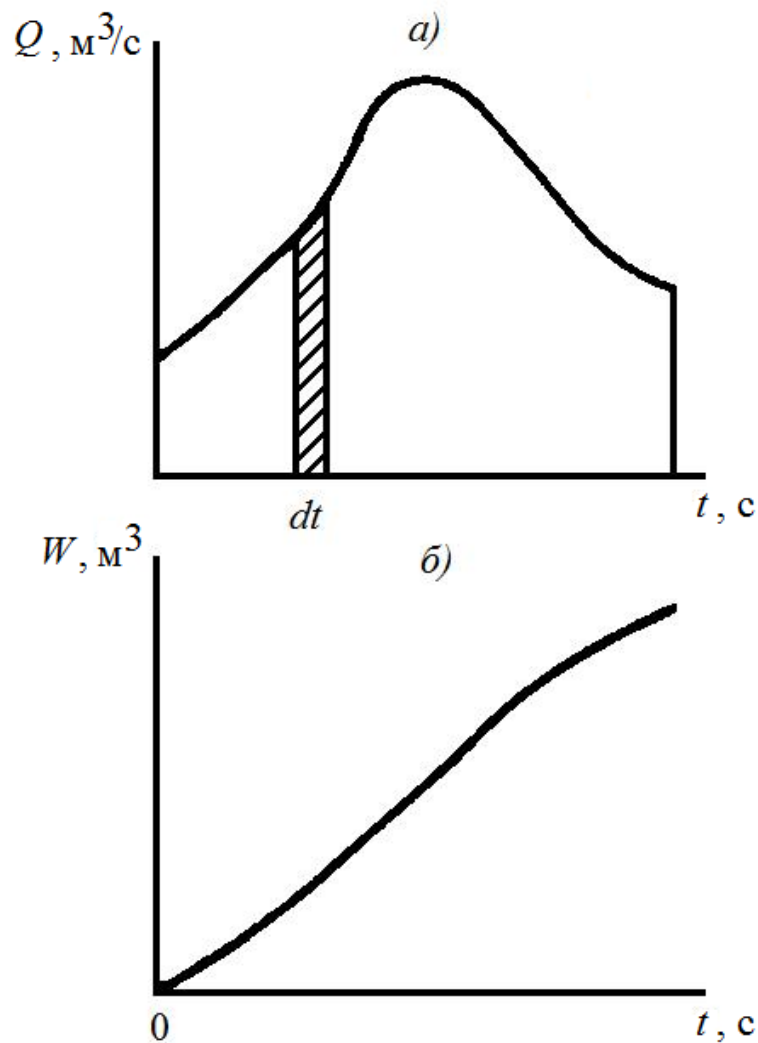


Рис. 2.5 – Гідрограф та інтегральна крива

Властивості інтегральної кривої:

1. Кожна ордината інтегральної кривої являє собою сумарний стік

від початку побудови до даного моменту часу.

2. Різниця ординат у двох точках інтегральної кривої дорівнює стоку, який пройшов за інтервал часу між цими точками.

3. Якщо витрата постійна в межах будь-якого інтервалу часу, то $W = Qt$, тобто при постійній витраті інтегральна крива перетворюється в пряму. Якщо гідрограф заданий у вигляді сходинок, інтегральна крива буде являти собою ламану лінією.

4. Тангенс кута нахилу α до осі абсцис лінійю, що січе інтегральну криву в точках A і B , виражає величину середньої витрати стоку в інтервалі часу між точками A і B (рис. 2.6).

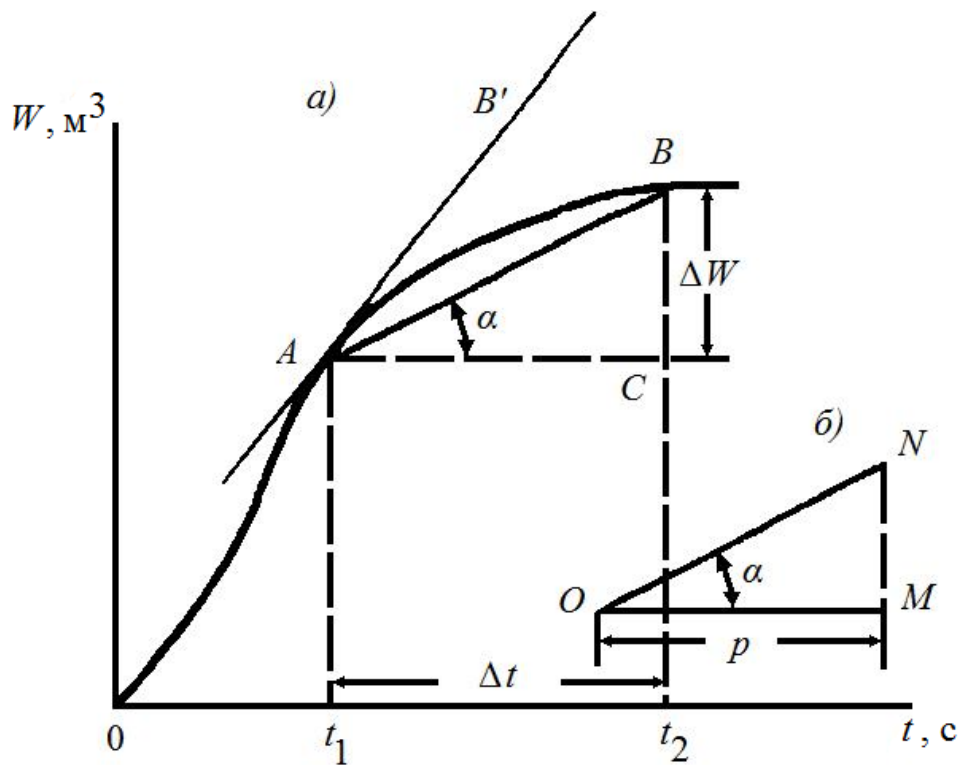


Рис. 2.6 – Інтегральна крива та променевий масштаб

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = Q_{\text{сеп}}. \quad (2.15)$$

5. Якщо точку B наближати до точки A та в ліміті сумістити з нею, січна стане дотичною, і тангенсом кута нахилу її до осі абсцис виразиться витрата в точці A

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dW}{dt} = Q. \quad (2.16)$$

Однак необхідно відмітити, що співвідношення (2.15) та (2.16)

будуть вірними лише в тому випадку, якщо інтегральні криві будуть побудовані в чисельно однакових масштабах. Практично інтегральні криві будуються в різних масштабах, що необхідно враховувати.

Позначимо масштаб об'ємів через m_W , а масштаб часу через m_t . Тоді за рис. 2.6 а довжини відрізків BC і AC складатимуть

$$BC = \frac{\Delta W}{m_W} \text{ і } AC = \frac{\Delta t}{m_t}. \quad (2.17)$$

Підставляючи обчислені значення в вираз (2.15), одержимо

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta W}{m_W} : \frac{\Delta t}{m_t} = Q \frac{m_t}{m_W}, \quad (2.18)$$

звідки будемо мати

$$Q = \operatorname{tg} \alpha \frac{m_W}{m_t}. \quad (2.19)$$

Таким чином, для того щоб визначити витрату за допомогою інтегральної кривої, необхідно вимірити відповідний тангенс кута нахилу та помножити його на відношення масштабів об'ємів та часу.

Визначення витрат за допомогою тангенса кута незручно, тому в практичних розрахунках користуються спеціальним графіком, який називається **променевим масштабом**, що дозволяє за нахилом січної або дотичної безпосередньо визначати витрати. Сутність променевого масштабу зводиться до наступного.

В будь-якому місці на графіку накреслюється горизонтальний відрізок $OM = p$, а через точку M вертикальна лінія (рис. 2.6 б). Накреслимо через точку O лінію ON паралельно AB (рис. 2.6 а), одержимо трикутник ONM , подібний до трикутника ABC . З подібності трикутників виходить, що

$$\frac{NM}{p} = \frac{BC}{AC} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = Q, \quad (2.20)$$

звідки

$$NM = pQ. \quad (2.21)$$

Отже, на вертикальній лінії відсікається відрізок NM , пропорційний

витраті Q . Тобто, вертикальна лінія – це **шкала витрат**, а рис. 2.6 б в цілому – **променевий масштаб**. Точка O називається **полюсом променевого масштабу**, а відрізок p – **полюсною відстанню**.

Для того, щоб побудувати променевий масштаб, необхідно задатися зручним масштабом шкали витрат m_Q і визначити p .

Використовуючи (2.15) і (2.16), вираз (2.21) перепишемо у вигляді $NM = p \operatorname{tg} \alpha$. Далі, беручи до уваги (2.18), одержимо

$$\frac{Q}{m_Q} = p \frac{m_t}{m_W} Q, \quad (2.22)$$

а після перетворень

$$p = \frac{m_W}{m_Q m_t}. \quad (2.23)$$

В залежності від потреб проектування, наявності початкових стокових даних та загальної тривалості розглядуваного періоду інтегральні криві будуються з різною докладністю: по добових, п'ятиденних, декадних, місячних, сезонних та річних інтервалах часу. Найбільш часто вони будуються по місячних інтервалах часу. Тоді початковими є середні місячні витрати.

Інтегральні криві будуються в різних масштабах в залежності від бажаної точності розрахунків регулювання і тривалості періоду, за який вона будується. При побудові інтегральної кривої за тривалий період зазвичай рекомендується масштаб для шкали часу (вісь абсцис) в 3 або 6 мм – 1 міс.

Слід також зазначити, що прямокутні координати не дають можливості побудувати інтегральну криву за тривалий період на графіку нормального розміру по висоті без істотного зменшення масштабу об'ємів. В результаті цього інтегральна крива втрачає наочність і стає малоприсадною для виконання за її допомогою розрахунків регулювання. Тому в практиці проектування зазвичай використовуються **різницеві (скорочені) інтегральні криві**, які можуть бути виражені як **інтегральні криві в косокутних координатах**. Перевагою цього виду кривих є те, що при нормальних розмірах висоти графіка масштаб об'ємів не зменшується і на кривій більш чітко відображені окремі характерні періоди в живленні річки – водопілля, межень, багатоводні і маловодні роки і періоди та ін. Це робить таку інтегральну криву наочною і дуже зручною для виконання розрахунків регулювання.

2.3 Розрахунки регулювання на жорсткий графік споживання

Жорстким називається графік споживання, ординати якого точно фіксовані на певні календарні дати і залишаються незмінними при переході від одного року до іншого. Зазвичай такий графік витрат має ступінчастий вигляд.

При регулюванні на постійну витрату припускається, що споживачі використовують воду по рівному графіку незалежно від пори року і при переході від одного року до іншого. При появі надлишків стоку над споживанням надлишки спочатку йдуть на наповнення водосховища, а потім скидаються вхолосту.

Перед початком розрахунків регулювання необхідно з'ясувати два положення. По-перше, чи необхідне регулювання взагалі і, по-друге, які масштаби очікуваного регулювання. Необхідність здійснення регулювання встановлюється порівнянням величин необхідної (зарегульованої) витрати води Q з мінімальною середньою добовою витратою річки Q_{\min} . Якщо $Q < Q_{\min}$, регулювання необхідне.

Масштаби регулювання визначаються порівнянням річного споживання води (зарегульованого стоку) W із стоком маловодного року W_p з заданою забезпеченістю p . При $W \leq W_p$ матиме місце сезонне регулювання, а при $W > W_p$ – багаторічне.

Для вирішення основних задач розрахунків регулювання має бути заданий стік у вигляді гідрографа або у вигляді відповідної інтегральної кривої: при сезонному регулюванні – за розрахунковий маловодний рік, при багаторічному регулюванні – за тривалий ряд років або за розрахунковий період.

Основні задачі розрахунків регулювання стоку:

- 1) задана зарегульована витрата Q , необхідно визначити необхідну для її підтримки корисну ємність водосховища;
- 2) задана ємність водосховища, необхідно визначити забезпечувану нею зарегульовану витрату;
- 3) необхідно встановити залежність величин Q від V .

При розрахунках регулювання по інтегральних кривих можна скласти баланс водосховища, що визначається об'ємами води, які надходять і витрачаються.

Запас води V_t , що міститься у водосховищі у момент t , виразиться рівністю

$$V_t = V_0 + \int_{t_0}^t (Q_{np} - Q) dt = V_0 + \int_{t_0}^t Q_{np} dt - \int_{t_0}^t Q dt, \quad (2.24)$$

де V_0 – запас води в початковий момент t_0 , м³;

Q_{np} – витрата води, що надходить у водосховище, м³/с;

Q – витрата води, що відводиться з водосховища, м³/с.

З наведеної рівності видно, що перший інтеграл виражає приріст об'єму припливу, що надходить у водосховище (за 2.11) за даний інтервал часу $(t - t_0)$, а другий – приріст об'єму води, що витрачається водосховищем.

Якщо наростання припливу до водосховища в часі описується інтегральною кривою, то, подібною інтегральною кривою можна виразити і наростання води, що витрачається водосховищем. Звідси, згідно з (2.24), різниці ординат інтегральних кривих припливу і споживання води характеризуватимуть стан наповнення водосховища в кожний момент часу.

Припустимо, що в межах деякого відрізка часу об'єми води, які надходять у водосховищі і відводяться з нього, будуть рівними, тобто

$$\int_{t_0}^t Q_{np} dt = \int_{t_0}^t Q dt. \quad (2.25)$$

Тоді наповнення водосховища на початку і наприкінці інтервалу $(t - t_0)$ залишиться однаковим.

Отже, паралельна інтегральній кривій лінія, що розташовується відносно неї на деякій відстані, характеризуватиме незмінне наповнення водосховища. При цьому, якщо вказану відстань в масштабі об'ємів креслення узяти такою, що дорівнює корисній ємності водосховища, верхня з них буде являти інтегральну криву спорожненого водосховища, а нижня – наповненого.

При нерівності споживання припливу наповнення водосховища змінюватиметься, зменшуючись при меншому припливі і збільшуючись при більшому в порівнянні із споживанням. Тому інтегральна крива зарегульованого стоку, що виражає повну величину (брутто) витрати (включаючи корисне споживання, холості скиди і втрати), що відводиться з водосховища, зображатиметься лінією, яка в періоди відновлення витрачених запасів води водосховища і витрачання цих запасів не буде паралельною інтегральній кривій припливу.

Таким чином, в залежності від стану наповнення водосховища і співвідношення між припливом у водосховище і споживанням лінія зарегульованих витрат буде паралельною інтегральній кривій або складатиме з нею деякий кут, не виходячи за межі смуги, обмеженої двома інтегральними кривими, віддаленими одне від одної на відстань ємності

водосховища.

Початкова інтегральна крива називається **основною**; додатково побудована у зв'язку з розрахунками регулювання, що виконуються – **контрольною**.

Сезонне регулювання. Для вирішення **першої задачі** (за заданою витратою визначити ємність водосховища) на інтегральній кривій в прямокутних координатах за водогосподарський розрахунковий маловодний рік (рис. 2.7 а) накреслимо праворуч дотичну Aaa' з нахилом заданої витрати Q (за допомогою променевого масштабу – рис. 2.7 б). Ця дотична є не що інше як інтегральна крива зарегульованої витрати в межах меженної частини року.

Оскільки зарегульована витрата більше природної, ординати нової інтегральної кривої перевищують, за виключенням точки дотику, ординати інтегральної кривої природного стоку. Отже, до водосховища припливає води менше, ніж використовується споживачами, інакше кажучи, тут має місце дефіцит стоку.

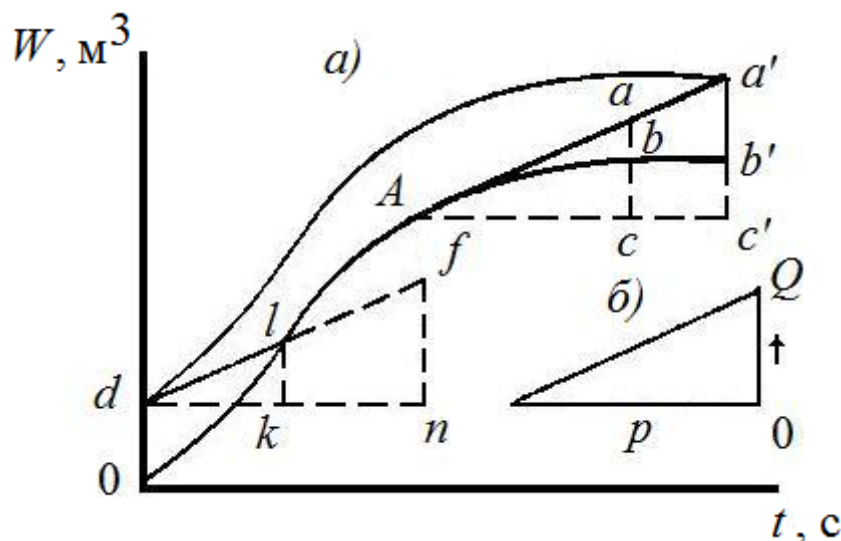


Рис. 2.7 – Визначення ємності водосховища за заданою витратою і розрахунки сезонного регулювання

Величини дефіциту визначаються відстанню в масштабі шкали об'ємів між інтегральними кривими зарегульованого і природного стоку, тобто різницею їхніх ординат, що витікає з властивостей інтегральних кривих, а також з рівності (2.24). У момент часу c дефіцит складає ab , а наприкінці року, суміщеного з кінцем межени, він досягає максимального значення $a'b'$. За весь період межени Ac' приплив складає $b'c'$, а зарегульований стік $a'c'$. Звідси дефіцит $a'b' = a'c' - b'c'$.

Очевидно, для покриття дефіциту необхідно мати відповідні запаси води у водосховищі. Ці запаси створюються в попередній маловоддю

багатоводний період. Так як величиною $a'b'$ визначається повний дефіцит, то в даному році досить мати запаси, що дорівнюють $a'b'$. Інакше кажучи дефіцитом $a'b'$ визначається необхідна корисна ємність водосховища V для зарегулювання витрати Q в розрахунковому році. Для того щоб забезпечити цю витрату на початок межені (у точці A), водосховище має бути наповнене; спрацюватиметься водосховище наприкінці межені, в точці a' . Визначивши корисну ємність водосховища V проаналізуємо порядок наповнення водосховища.

Для полегшення розрахунків наповнення на відстані, що дорівнює, ємності водосховища, будується контрольна інтегральна крива паралельно і вище основної. Вона проходить через точку a' , яка відповідає кінцю межені, коли водосховище спорожнене, і називається **інтегральною кривою спороженого водосховища**. В цьому випадку основна інтегральна крива є **кривою наповненого водосховища**.

З точки d контрольної кривої, що відповідає кінцю межені попереднього водогосподарського року і початку водопілля даного року, будується промінь заданої витрати до перетину з основною інтегральною кривою в точці l . У цей момент водосховище виявляється наповненим. Таким чином, водосховище наповнюється протягом періоду dk , а в подальший період до початку спрацювання (точка A) воно залишається наповненим, завдяки чому лінія інтегральної кривої зарегульованого стоку збігається з природною. Цей період (kn) характеризується роботою водосховища на витратах припливу, що перевищують задану витрату Q , наслідком чого є надлишки, що скидаються. Неважко побачити, що об'єм скидів дорівнює Af , оскільки із загального припливу за період від початку наповнення водосховища до початку спрацювання, що виражається ординатою A , об'єм Od пішов на наповнення корисної ємності, а об'єм fn – на задоволення потреби у воді.

В цьому розрахунку і полягає вирішення першої задачі.

Для вирішення **другої задачі** – визначення за заданою ємністю зарегульованої витрати – необхідно виконати дії, зворотні тим, які виконуються при вирішенні першої задачі. А саме, від кінця інтегральної кривої вгору у відповідному масштабі відкладається задана ємність водосховища V (рис. 2.8 *a*). Шляхом креслення через відкладену точку дотичної до інтегральної кривої і визначається забезпечувана даною ємністю зарегульована витрата, величина якої може бути визначена за допомогою променевого масштабу (рис. 2.8 *б*). Подальший розрахунок і побудова лінії зарегульованих витрат на решті частині року нічим не відрізняються від попереднього (див. вирішення першої задачі).

При вирішенні **третьої задачі** – встановленні залежності Q від V – достатньо розглянути лише межену частину року. Вирішення полягає в побудовах, аналогічних другої задачі, і полягає в тому, що задається низка

значень ємності водосховища V_1, V_2, V_3, \dots і по інтегральній кривій (рис. 2.8 а) і променевому масштабу (рис. 2.8 б) визначаються відповідні ним зарегульовані витрати Q_1, Q_2, Q_3, \dots . На підставі цих даних будується залежність $Q = f(V)$. Крайніми точками залежності є: точка при $V=0$, якій відповідає витрата Q , що дорівнює мінімальній природній $Q_{\text{мін}}$, і точка при $V_{\text{макс}}$, при якій забезпечується повне внутрішньорічне регулювання з $Q = Q_{\text{сер}}$. Вид подібної залежності зображений на рис. 2.8 в.

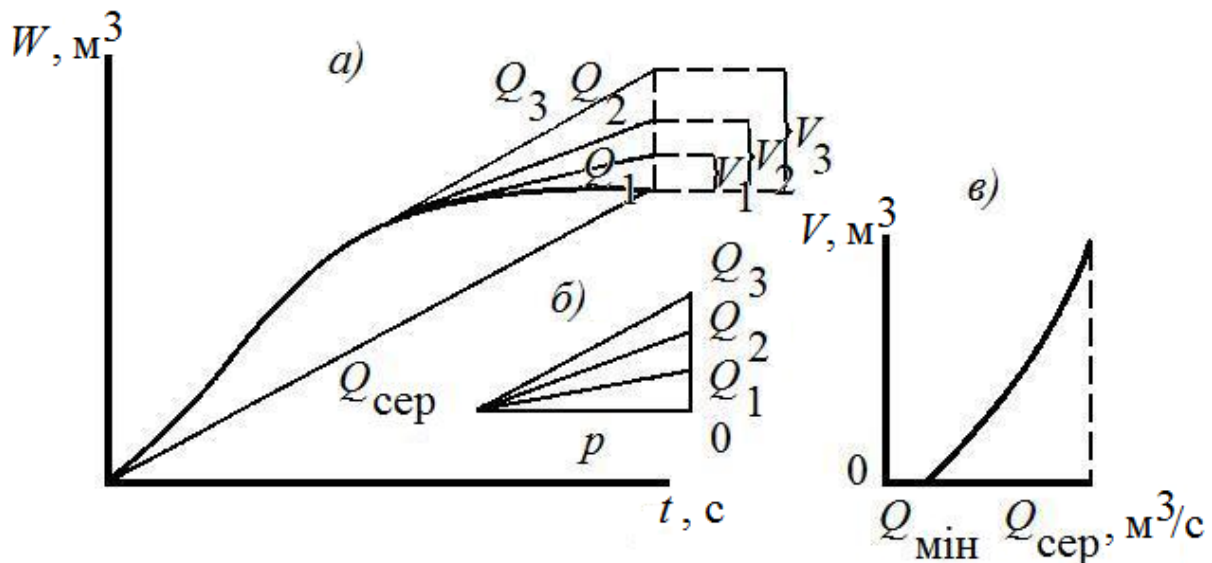


Рис. 2.8 – Визначення витрати по заданій ємності при сезонному регулюванні і залежність зарегульованих витрат від ємності водосховища

Абсолютно однаково ці задачі вирішуються і по інтегральних кривих в косокутних координатах.

Багаторічне регулювання. Оскільки метою багаторічного регулювання є згладжування багаторічних коливань стоку, при розрахунках цього виду регулювання розглядаються не окремі водогосподарські роки, як це мало місце в разі сезонного регулювання, а гідрологічні ряди достатньо великої тривалості.

Для вирішення тих же основних задач розрахунків при багаторічному регулюванні перш за все необхідно на інтегральній кривій за тривалий ряд відшукати найбільш маловодний період.

На рис. 2.9 такий період складають роки 7-9 або, можливо, триваліший період – роки з 4 по 9, якщо глибина багаторічного регулювання буде дуже великою.

Перша задача (за заданою витратою визначити ємність) вирішується шляхом креслення дотичної Aa до інтегральної кривої наприкінці маловоддя ходом назад з нахилом заданої витрати Q (рис. 2.9).

Найбільша відстань ab між побудованою дотичною і інтегральною кривою в межах маловоддя і визначить необхідну для здійснення багаторічного регулювання ємність водосховища V за заданою витратою Q .

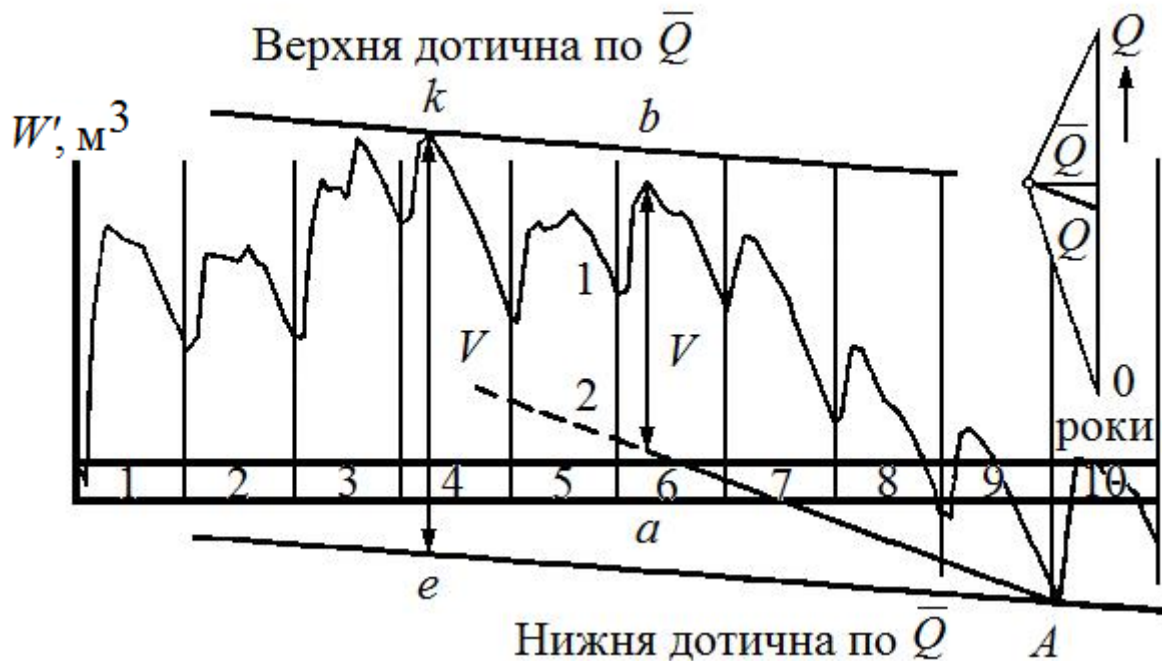


Рис. 2.9 – Визначення ємності водосховища за заданою витратою при багаторічному регулюванні

Умовні позначення: 1 – інтегральні криві природного стоку;
2 – інтегральні криві зарегульованого стоку

Виконаним розрахунком охоплений період спрацювання водосховища. При даній витраті Q в спрацювання залучені маловодні роки 7-9 і межень передуючого ним 6-го року. Очевидно, при значно більшій величині зарегульованої витрати Q спрацювання водосховища може розпочатися раніше, оскільки і 4-й рік є дуже маловодним, не дивлячись на те, що маловодне триріччя (7-9 років) відокремлене від 4-го року двома роками підвищеної водності (5 і 6 роки).

Визначивши таким чином корисну ємність водосховища V , виконують розрахунки регулювання за рештою років наявного ряду, для чого будують контрольну інтегральну криву (рис. 2.10), як вказано раніше. Насамперед виконується розрахунок по періоду, наступному, за повним спрацюванням водосховища, тобто від точки A праворуч. Цей період (у нашому випадку один рік) характеризується підвищеним сумарним

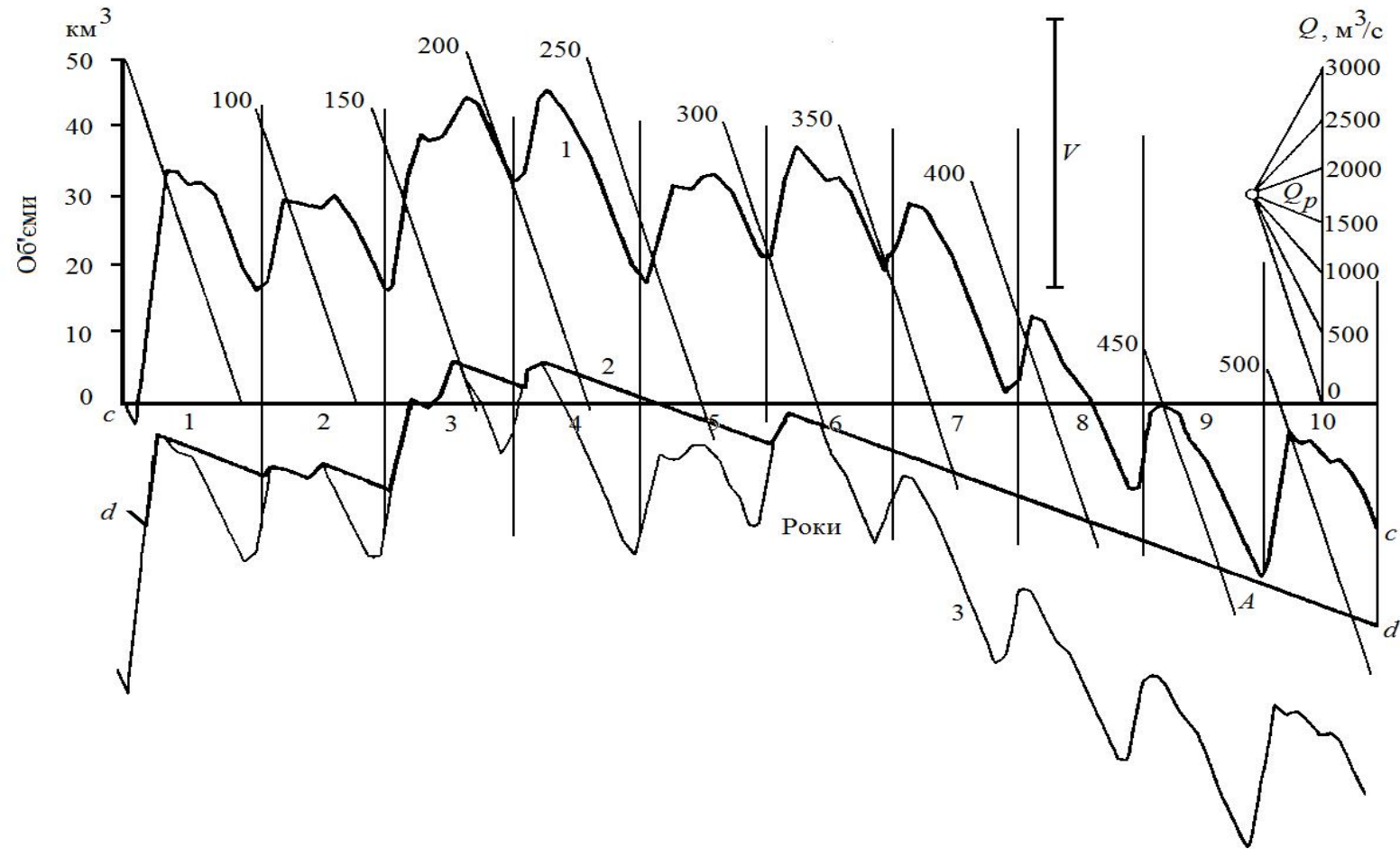


Рис. 2.10 – Розрахунок багаторічного регулювання на постійну витрату

Умовні позначення: 1 – інтегральні криві природного стоку;
 2 – інтегральні криві зарегульованого стоку;
 3 – контрольна інтегральна крива

припливом в порівнянні із зарегульованою витратою Q , отже, протягом нього відбуватиметься відновлення раніше витрачених запасів води – наповнення водосховища.

Лінія aA зарегульованої витрати Q триває (праворуч) до перетину з контрольною інтегральною кривою або до кінця ряду, якщо такого перетину не відбувається.

Зустріч лінії зарегульованої витрати з контрольною інтегральною кривою означає, що водосховище в цій точці наповнилося. Далі (поки витрати припливу більше зарегульованих) лінія зарегульованих витрат збігається з контрольною інтегральною кривою, а потім відхиляється від неї, коли витрати припливу стають менше зарегульованої витрати Q . Відрізок часу, протягом якого лінія зарегульованих витрат збігається з контрольною інтегральною кривою, характеризується роботою водосховища при постійному рівні на відмітці НПГ, і витрати зарегульовані дорівнюють витратам припливу (природним). У решту часу, поки відбувається спрацювання (основна інтегральна крива і лінія зарегульованої витрати зближуються) або наповнення водосховища (основна інтегральна крива і лінія зарегульованої витрати віддаляється одна від одної), рівень водосховища перебуває на відмітках нижче НПГ.

Після повного спрацювання в точці A , водосховище до кінця гідрологічного ряду (наприкінці 10-го водогосподарського року) виявляється наповненим на величину cd . Щоб не порушувати балансу стоку протягом всього гідрологічного ряду, тобто щоб сумарний зарегульований стік залишився рівним природному, необхідно мати такі ж запаси води cd і на початку ряду (рис. 2.10).

Відклавши ці запаси води вниз від основної інтегральної кривої на початку ряду, продовжимо аналогічний розрахунок ходом вперед до зімкнення з точкою a . У цій точці визначилися розміри корисної ємності водосховища, а праворуч від неї вже виконані розрахунки регулювання.

Вказаний розрахунок від початку гідрологічного ряду до точки a починається з проведення через точку d (рис. 2.10) заданої витрати Q до перетину з контрольною інтегральною кривою. В межах ділянки, на якій $Q_{np} > Q$, лінія зарегульованих витрат йде по контрольній інтегральній кривій, а далі (при $Q_{np} < Q$) відхиляється від неї.

Так продовжується розрахунок, поки не буде одержана безперервна лінія зарегульованих витрат 2 (рис. 2.10). Вона складається з відрізків прямої з нахилом, що відповідає заданій витраті Q , і ділянок кривих, паралельних основній інтегральній кривій, в межах яких водосховище працює по припливу при заповненій доверху ємності.

Вирішення **другої задачі** також починається з розглядання відібраного маловоддя. На відстані, що дорівнює заданій ємності V , вниз

від основної кривої будується контрольна інтегральна крива (рис. 2.10). У смузї між основною і контрольною інтегральними кривими будується пряма Aa , яка є дотичною до основної інтегральної кривої наприкінці маловоддя (у точці A) і до контрольної інтегральної кривої на початку маловоддя (точка a). Нахилом цієї дотичної і визначиться величина шуканої зарегульованої витрати Q . Визначивши вказаним шляхом величину зарегульованої витрати, виконують розрахунок регулювання на решті ділянок інтегральної кривої. Ці розрахунки ведуться в тій же послідовності, як і при вирішенні першої задачі.

Третю задачу простіше і зручніше вирішувати як і першу. Для цього необхідно задатися рядом значень витрат $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$ і по інтегральній кривій визначити необхідні для їх зарегулювання ємності водосховища $V_1, V_2, V_3 \dots$. За одержаними даними будується крива $Q = f(V)$, яка є продовженням аналогічної кривої при сезонному регулюванні стоку (рис. 2.8 в).

Якщо при сезонному регулюванні верхньою межею залежності $Q = f(V)$ є середня річна витрата розрахункового маловодного року $Q_{сер}$, то при багаторічному регулюванні ним є середня багаторічна річна витрата \bar{Q} . До витрати \bar{Q} шукана залежність наближається асимптотично, що свідчить про малий вплив збільшення ємності водосховища на зарегульовану витрату при наближенні останньої до \bar{Q} . Характер залежності $Q = f(V)$, при якому одному і тому ж приросту ємності в нижній частині її відповідають великі прирости зарегульованих витрат, а у верхній частині – менші, пояснюється впливом тривалості періоду спрацювання водосховища. Із зростанням ємності V збільшується період спрацювання T , у зв'язку з чим знижується відносний ефект збільшення ємності водосховища ΔV , оскільки величина ΔQ зворотно пропорційна тривалості періоду спрацювання T .

Для наявного багаторічного періоду верхньою межею ємності водосховища, що забезпечує найвищий ступінь зарегулювання стоку до середньої витрати за цей період, є така ємність, яка в змозі здійснити повний перерозподіл стоку за даний період. Ємність повинна мати можливість не лише створити запаси води, які забезпечують покриття дефіциту за тривале маловоддя, але і забезпечити акумуляцію надлишків стоку за найбільш багатоводну частину періоду.

Величина ємності водосховища, що забезпечує повний перерозподіл стоку, визначиться по вертикальній відстані ke в масштабі об'ємів між верхньою і нижньою дотичними до інтегральної кривої (рис. 2.9), що побудовані з нахилом середньої багаторічної витрати за цей період.

Необхідно мати на увазі, що у межах сезонного регулювання, тобто в зоні $Q < Q_{сер}$, залежність $Q = f(V)$, інколи звертається в пряму, якщо з

глибиною регулювання не змінюється тривалість періоду спрацювання водосховища. Таке положення обумовлюється особливістю внутрішньорічного розподілу стоку і характерно для деяких річок з весняним водопіллям, у яких велике і зосереджене водопілля змінюється низькою і розтягнутою меженню (Казахстанський і Східноєвропейський підтипи режиму витрат за класифікацією Б.Д. Зайкова).

Розрахунки регулювання по інтегральних кривих **на жорстко заданий ступінчастий графік витрат** ведуться однаково і в тій же послідовності, як це було показано для випадків регулювання на постійну витрату.

2.4 Табличний спосіб розрахунків регулювання стоку – розрахунок балансу водосховища

Разом з графічними методами застосовується табличний спосіб розрахунку регулювання стоку, який зводиться до вирішення рівняння балансу водосховища. Для інтервалу часу Δt рівняння балансу має вигляд

$$\pm \Delta V = Q_a \Delta t = (Q_{np} - Q_{\bar{b}p}) \Delta t = [Q_{np} - (Q + Q_c + Q_v)] \Delta t, \quad (2.26)$$

де ΔV – зміна наповнення водосховища (акумуляція) (знак плюс відповідає збільшенню наповнення водосховища, знак мінус – зменшення (спрацювання)), км³;

Q_a – витрата акумуляції, тобто різниця витрати, що надходить до водосховища Q_{np} і зарегульованої брутто $Q_{\bar{b}p}$, м³/с;

Q – витрата, що використовується, м³/с;

Q_c – витрата холостих скидів, м³/с;

Q_v – сумарна витрата втрат і вилучень води з водосховища, м³/с.

В залежності від необхідної точності і докладності розрахунок ведеться за різними інтервалами часу Δt .

Розрахунки регулювання стоку рекомендується вести за формою табл. 2.1.

Послідовність розрахунків залишається такою же, що і при графічних розрахунках. Вирішуючи, наприклад, задачу визначення ємності водосховища за заданою витратою, розрахунок ведеться ходом назад:

а) при сезонному регулюванні з кінця розрахункового маловодного року;

б) при багаторічному регулюванні – з кінця найбільш несприятливого маловодного періоду.

Таблиця 2.1 – Розрахунок балансу водосховища

№	Дата (розрахунковий інтервал)	Витрати, м ³ /с			Об'єми, км ³				Горизонти верхнього б'єфа, м		Площа дзеркала на середину інтервалу, км ²	Витрати, м ³ /с			
		припливу (природні)	зарегульовані (брутто)	акумуляції	акумуляції	наповнення водосховища		на кінець інтервалу	на середину інтервалу	втрат і вилучень		скидів (холостих)	сума втрат, скидів та ін.	зарегульовані (нетто)	
						на кінець інтервалу	на середину інтервалу								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
						5,60		110,00							
1	IV-II	2352	2352	0	0	5,60	5,60	110,00	110,00	808	35	0	35	2317	
2	V-I	6471	3385	3086	2,66	8,26	6,93	112,96	111,59	909	35	0	35	3350	
3	2	2726	4416	1310	1,13	9,39	8,83	114,00	113,47	1065	35	1181	1216	3200	
4	3	5350	5350	0	0	9,39	9,39	114,00	114,00	1118	35	2115	2150	3200	
...	

Вписавши в графу 3 витрати припливу в водосховище (природні витрати стоку або ті, що враховують регулювання іншими водосховищами), а в графу 4 задану зарегульовану витрату бруто (або декілька витрат), послідовно визначають різниці (витрати акумуляції), які записують потім в графу 5. Помноженням цих різниць на відповідний інтервал часу Δt в секундах обчислюються об'єми акумуляції (графу 6), підсумовуванням яких ходом назад (знизу догори) визначається наповнення водосховища на кінець розрахункових інтервалів (графу 7). Найбільшим наповненням в межах розрахункового року (при сезонному регулюванні) або в межах всього несприятливого маловодного періоду (при багаторічному регулюванні) і визначиться корисна ємність водосховища.

Визначивши розміри корисної ємності водосховища, продовжується розрахунок ходом вперед:

а) при сезонному регулюванні – від початку водогосподарського року до моменту заповнення ємності і далі до початку спрацювання при роботі водосховища на витратах припливу, тобто при повному наповненні водосховища;

б) при багаторічному регулюванні – від початку попереднього розрахунку, тобто з кінця маловоддя, до моменту заповнення ємності і далі до кінця всього періоду, працюючи або на витратах припливу, або на заданій витраті.

Далі виконується розрахунок від початку даного періоду до початку спрацювання протягом маловоддя. При цьому з метою збереження балансу стоку в межах всього даного періоду наповнення водосховища на початку періоду приймається рівним наповненню наприкінці його.

Подальший розрахунок зводиться до визначення зарегульованих витрат нетто (графу 15), для чого необхідно обчислити втрати і об'єми (графу 12), холості скиди (графу 13) та ін. Втрати обчислюються або як середні в межах кожного інтервалу Δt , або як середні за багаторічний період. У першому випадку втрати визначаються при наповненні водосховища, що дорівнюють середньому за Δt (графу 8), а в другому – середньому за весь період.

При значних змінах в часі втрат і вилучень зарегульовані витрати нетто можуть коливатися від інтервалу до інтервалу у великих межах. Тому при необхідності мати вирівняну витрату нетто виконаний розрахунок слід відкоректувати, зробивши постійною зарегульовану витрату нетто, для чого вводиться додаткова графа 16. Зарегульована витрата бруто при цьому відповідно зміниться; також зміниться і хід наповнення й спрацювання водосховища.

Питання для самоперевірки

1. Які види регулювання стоку Ви знаєте? Поясніть їхню сутність.
2. Яка крива називається інтегральною кривою стоку?
3. Назвіть основні властивості інтегральної кривої стоку.
4. Який графік споживання називається жорстким?
5. В чому полягає сутність розрахунків регулювання на постійну витрату?
6. Назвіть основні задачі розрахунків регулювання стоку.
7. Які методи розрахунку регулювання по інтегральних кривих Ви можете назвати? Охарактеризуйте їх.
8. Назвіть основні складові рівняння балансу водосховища.

3 РОЗРАХУНКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОЇ СТАТИСТИКИ НА ЖОРСТКИЙ ГРАФІК СПОЖИВАННЯ

3.1 Основні положення

Застосування статистичних методів до розрахунків регулювання ґрунтується на тому положенні, що умови роботи водосховища визначаються взаємодією річкового стоку і споживання води. При цьому річковий стік розглядається як випадкова величина, що підкоряється закону розподілу імовірностей. Споживання є продуктом діяльності людини і не має випадкових коливань, якщо не вважати коливань, що є результатом мінливості самого стоку. Логічно з цього витікає система розрахунку, яка застосовує математичну статистику безпосередньо до явищ річкового стоку і одержує водогосподарські характеристики як результат математичного аналізу виходячи з розподілу імовірності стоку.

Основною характеристикою річного стоку та його мінливості, як відомо, є норма \bar{W} і коефіцієнт мінливості C_v . Характеристикою регулювання є віддача A , необхідна для її підтримки ємність водосховища $V_{баг}$ і забезпеченість безперебійної віддачі p .

Відомо, що між параметрами регулювання $(A, V_{баг}, p)$ і параметрами стоку (\bar{W}, C_v) повинна існувати функціональна залежність $A = f(\bar{W}, C_v, V_{баг}, p)$.

Статистичні методи розрахунку регулювання стоку розроблювалися і розвивалися на базі гідрологічних матеріалів добре вивчених водотоків різних фізико-географічних зон, що дозволяло виконувати широкі узагальнення. Деякі з цих узагальнень доводилися до розрахункових

графіків, що одержали загальне визнання і розповсюдження внаслідок їхньої обґрунтованості, простоти розрахунку і порівнянності результатів регулювання по них.

Засновані на використанні багатого досвіду гідрології по великій кількості річок узагальнені методи розрахунку багаторічного регулювання виходять з різних можливих комбінацій стоку, тоді як в розрахунках по календарних стокових рядах навіть при їхній значній довжині враховується лише одна єдина комбінація, що спостерігалася в минулому періоді. Таким чином, можна чекати, що узагальнені методи розрахунку багаторічного регулювання дають більш надійні результати. У цьому одна з важливих переваг узагальнених методів розрахунку багаторічного регулювання перед розрахунками по календарних стокових рядах (по інтегральних кривих).

Розрахунки по статистичних методах зазвичай ведуться у відносних величинах.

Прийняті такі позначення:

а) річний стік будь-якого члена ряду – модульний коефіцієнт

$$K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}, \quad (3.1)$$

де Q_i – середня річна витрата будь-якого року, м³/с;

\bar{Q} – середня багаторічна витрата, м³/с.

б) віддача – коефіцієнт регулювання

$$\alpha = \frac{Q}{\bar{Q}}; \quad (3.2)$$

де Q – зарегульована (гарантована) витрата, м³/с.

в) багаторічна ємність водосховища – коефіцієнт ємності

$$\beta = \frac{V_{\text{баг}}}{\bar{W}}; \quad (3.3)$$

де $V_{\text{баг}}$ – багаторічна ємність водосховища, м³;

$\bar{W} = 31,5 \cdot 10^6 \bar{Q}$ – середній річний об'єм стоку, м³.

г) забезпеченість безперебійної віддачі, тобто число років, в які гарантуватиметься віддача по відношенню до загального числа років ряду p у відсотках і в частках від одиниці.

3.2 Перший метод С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля (1930 р.)

Першу пропозицію по статистичних методах розрахунку регулювання стоку в нашій країні зробили С.Н. Крицький та М.Ф. Менкель в 1930 р. Цей метод був присвячений проблемі багаторічного регулювання. Полягає він у визначенні за маловодні n -річчя «дефіцитів стоку», що підлягають покриттю з водосховища, за різницею між заданою віддачею і стоком прийнятої забезпеченості.

Порівнянням дефіцитів за низку n -річ різної довжини встановлюється найбільша величина дефіциту, який ототожнюється з необхідною багаторічною ємністю водосховища та тривалістю критичного періоду спрацювання, що відповідає їй.

Практично вирішення задачі зводиться до поширення формул, що застосовуються для визначення статистичних параметрів річного стоку окремих членів ряду на послідовні суми річних величин стоку за n -річчя.

Нехай буде заданий ряд в N років з річними величинами стоку $K_1, K_2, K_3 \dots K_N$ і задана річна віддача α .

Якщо $\alpha < K_i$, то дефіциту в цьому році немає і віддача буде повністю забезпечена за рахунок припливу у водосховище. У роки, коли $\alpha > K_i$, дефіцит є. Максимальна величина дефіциту буде в найбільш маловодному році даного ряду.

Оскільки в ході стоку спостерігаються угруповання років різної водності, дефіцит, визначений аналізом величин стоку за окремі роки при заданому α , як правило, не дасть максимальної його величини. Тому на наступному етапі розрахунків необхідно піддати аналізу дефіцити за два суміжних роки, потім за три суміжні роки і так далі.

Середній стік за два суміжні роки дорівнює

$$\frac{K_1 + K_2}{2}, \frac{K_2 + K_3}{2} \dots \frac{K_{N-1} + K_N}{2}, \quad (3.4)$$

за три суміжні роки

$$\frac{K_1 + K_2 + K_3}{3}, \frac{K_2 + K_3 + K_4}{3} \dots \frac{K_{N-2} + K_{N-1} + K_N}{3} \text{ і т.д.} \quad (3.5)$$

Позначаючи середні величини стоку відповідним індексом за числом років обраного угруповання через $K_i^{(2)}, K_i^{(3)}, \dots, K_i^{(n)}$ одержимо дефіцити Z_i :

за два роки

$$Z_i^{(2)} = (\alpha - K_i^{(2)})2, \quad (3.6)$$

за три роки

$$Z_i^{(3)} = (\alpha - K_i^{(3)})3, \quad (3.7)$$

за n років

$$Z_i^{(n)} = (\alpha - K_i^{(n)})n, \quad (3.8)$$

Вибіркою з кожного угруповання найбільшого дефіциту і побудовою відповідної залежності $Z = f(n, \alpha)$ (рис. 3.1) визначиться максимальний дефіцит при заданій віддачі α . Величиною цього дефіциту і визначиться шуканий розмір необхідної багаторічної ємності водосховища β .

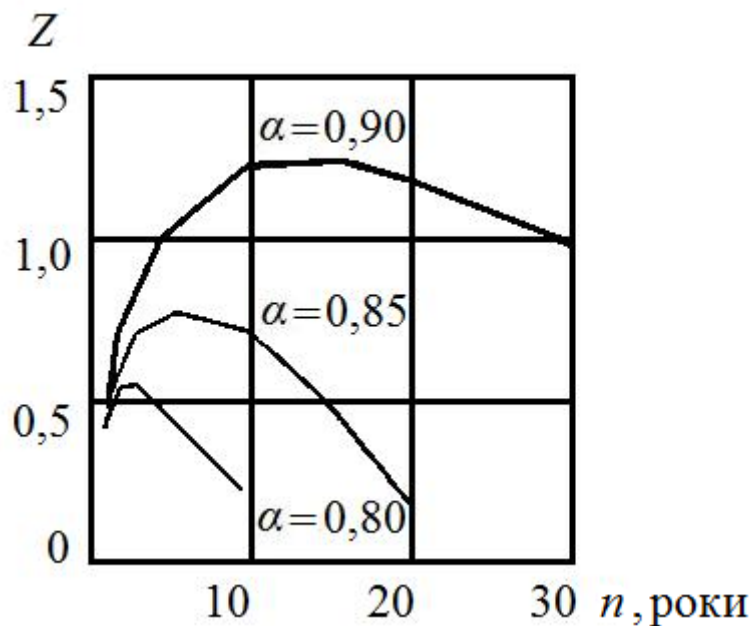


Рис. 3.1 – Графік залежності $Z = f(n, \alpha)$

При збільшенні віддачі збільшується дефіцит і тривалість критичного періоду спрацювання водосховища, при зменшенні віддачі, навпаки, зменшується дефіцит і тривалість критичного періоду спрацювання водосховища (рис. 3.1). Те, що зі збільшенням числа років угруповань дефіцит спочатку зростає, а потім знижується, пояснюється включенням в нього багатоводних років, які підвищують середній стік

n -річчя, імовірність появи яких збільшується з розширенням угруповання.

Виконаний розрахунок багаторічної ємності виходить з умов безперебійної роботи водосховища при заданій віддачі, тобто при 100 %-ої забезпеченості, тому що в кожному угрупованні обирається найбільший дефіцит. При орієнтуванні на будь-яку певну забезпеченість p водність n -річ повинна відповідати цій забезпеченості.

Тоді вираз для визначення розрахункового дефіциту набуде вигляду

$$Z_p^{(n)} = (\alpha - K_p^{(n)})n, \quad (3.9)$$

Максимальний дефіцит, що визначає необхідні розміри водосховища, як і раніше буде визначений за залежністю, аналогічній показаній на рис. 3.1.

Таким чином, можна записати

$$\beta = \max Z_p^{(n)} = \max [(\alpha - K_p^{(n)})n]. \quad (3.10)$$

Модульні коефіцієнти річного стоку за n -річчя при заданій забезпеченості визначаються за допомогою таблиць С.І. Рибкіна, для чого необхідно знати параметри кривих розподілу за відповідні n -річчя – коефіцієнти мінливості $C_v^{(n)}$ і асиметрії $C_s^{(n)}$.

За наявності календарного ряду ці параметри можна визначити звичайним шляхом, послідовно розглядаючи величини стоку за два, три та ін. роки. Проте, ґрунтуючись на відомому з теорії імовірності положенні про те, що для ряду незалежних випадкових величин середньоквадратичне відхилення від норми середніх значень з групи, що складається з n членів $\sigma^{(n)}$ в \sqrt{n} разів менше середньоквадратичного відхилення від норми окремих членів ряду, вказані параметри з достатньою для практичних цілей точністю можуть бути визначені приблизно, за співвідношеннями

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}; \quad C_s^{(n)} = \frac{C_s}{\sqrt{n}}. \quad (3.11)$$

Початковими є параметри C_v і C_s , що характеризують криву розподілу імовірностей річних величин стоку (тобто окремих членів ряду).

Результати розрахунку дефіцитів записуються в такій формі (табл. 3.1).

Абсолютні розміри багаторічної ємності водосховища по максимальному значенню дефіциту при заданій віддачі з прийнятою забезпеченістю p обчислюються за виразом

$$V_{\bar{a}a_2} = \beta \bar{W}. \quad (3.12)$$

3.3 Другий метод С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля (1935 р.)

Метод 1930 р. не зовсім суворий, на що звернули увагу самі автори, оскільки не охоплює всіх можливих комбінацій стоку і не дає точної відповіді на питання про те, наскільки при заданій віддачі і ємності водосховища імовірні випадки перебоїв гарантованої віддачі за межами розрахункової забезпеченості. Внаслідок цього ними ж в 1935 р. був запропонований другий метод розрахунку.

Таблиця 3.1 – Розрахунок дефіциту стоку

n	$C_v^{(n)}$	$C_s^{(n)}$	$K_p^{(n)}$	$Z_p^{(n)} = (\alpha - K_p^{(n)})n$			
				α_1	α_2	α_3	α_4
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,350	0,700	0,506	0,244	0,294	0,344	0,394
2	0,248	0,496	0,633	0,243	0,334	0,434	0,534
3	0,202	0,404	0,693	0,174	0,321	0,471	0,621
4	0,175	0,350	0,732		0,272	0,472	0,672
5	0,156	0,312	0,759			0,455	0,705
6	0,143	0,286	0,780			0,420	0,720
7	0,132	0,254	0,790				0,735
8	0,124	0,248	0,807				0,745
9	0,117	0,234	0,817				0,747
10	0,111	0,222	0,825				0,750
11	0,105	0,210	0,833				0,737

Метод 1935 р. заснований на складанні кривих забезпеченості стоку.

Нехай необхідно одержати криву забезпеченості сум $z = x + y$, причому x задана у вигляді безперервної кривої забезпеченості a , а y – ступінчастої b (рис. 3.2).

Суми матимуть величини або $z = x + y_1$ або $z = x + y_2$ імовірність перших дорівнює n_1 , імовірність других – n_2 (причому $n_1 + n_2 = 1,0$). Криві забезпеченості цих сум, що називаються **частковими кривими забезпеченості**, одержуються з безперервної кривої x додаванням до всіх ординат в першому випадку y_1 і в другому y_2 (рис. 3.2 в).

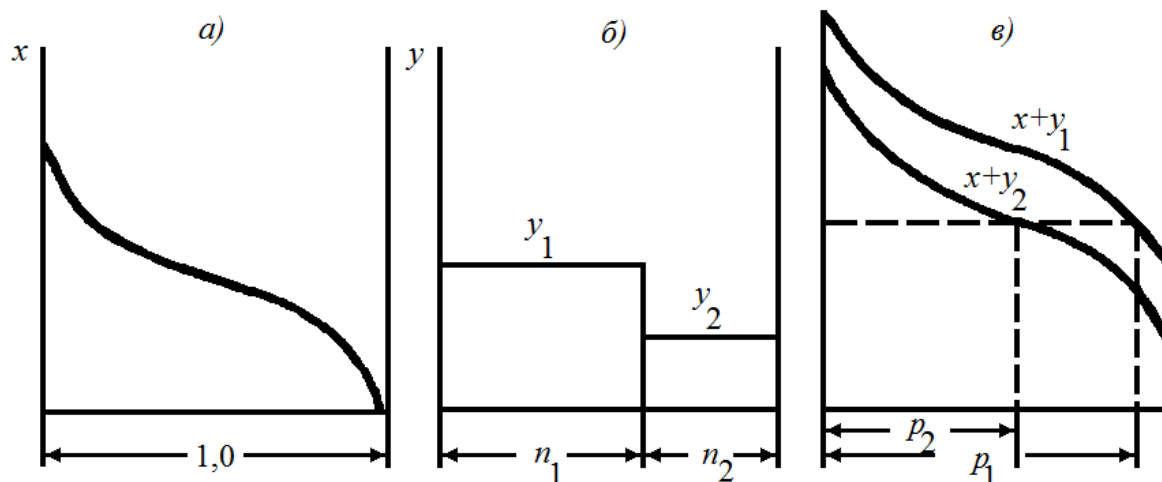


Рис. 3.2 – Схема складання кривих забезпеченості

Забезпеченість p довільно обраної суми z_i визначиться через забезпеченості часткових сум, які позначимо p_1 у ряду $x + y_1$ і p_2 у ряду $x + y_2$. Загальна забезпеченість p суми z_i у ряду тих та інших сум складатиме

$$p = p_1 n_1 + p_2 n_2. \quad (3.13)$$

Якщо крива забезпеченості y задана у вигляді ряду сходинок $\Delta n_1, \Delta n_2, \dots (\sum \Delta n_i = 1, 0)$, то

$$p = \sum p_i \Delta n_i. \quad (3.14)$$

Якщо ж крива забезпеченості y задана рівновеликими по основі сходинками, тобто якщо $\Delta m = \frac{1}{s}$, де s число рівних інтервалів, то

$$p = \frac{1}{s} \sum p_i. \quad (3.15)$$

Якщо ж крива забезпеченості y також є безперервною кривою, то

$$p = \int_{n=0}^{n=1} p_n dn, \quad (3.16)$$

де p_n – функція n .

Практичні прийоми вирішення задачі визначення p при y , заданої у вигляді безперервної кривої, зводяться до наступного.

Основа кривої y розбивається на s рівних інтервалів і для меж всіх інтервалів Δn_i визначаються y_i , число яких $s+1$. Потім будуються часткові криві сум $x + y_i$ і за ними для будь-яких значень сум z_i у всьому можливому їхньому діапазоні визначаються p_i . Так як число часткових кривих є на одиницю більшим, ніж число інтервалів, то p необхідно визначати як середнезважене, користуючись формулою трапецій

$$p = \frac{1}{s} \left(\frac{p_0}{2} + p_1 + p_2 + \dots + \frac{p_s}{2} \right). \quad (3.17)$$

Швидше і точніше (так як виключаються похибки при побудові кривих сум $x + y$) цю ж задачу можна вирішити, не будуючи часткові криві сум. Для цього часткові забезпеченості p_i необхідно визначати за основною кривою x по значеннях $x_i = z - y_i$. Очевидно, що p_i буде однаковим, якщо брати його або за кривою сум $x + y_i$ при обраному z або за основною кривою x при значенні $x_i = z - y_i$.

З'ясувавши сутність складання кривих забезпеченості, можна перейти до розглядання другого методу С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля.

Нехай будуть задані: крива забезпеченості річного стоку, що характеризується величинами C_v і C_s , багаторічна ємність водосховища p і віддача α . Необхідно визначити імовірність (відносне число) таких років, впродовж яких задана віддача α не буде повністю задовольнятися, тобто настануть перебої в подачі гарантованої кількості води α .

Очевидно, ті окремі роки, в які річний стік $K < \alpha - \beta$, тобто дефіцит стоку $\alpha - K$ не покривається повними запасами води у водосховищі β , є безумовно перебійними. Для того щоб одержати число таких років, необхідно взяти на кривій забезпеченості (рис. 3.3, 1) ординату $K = \alpha - \beta$, забезпеченість якої $p_{\alpha-\beta}$. Тоді імовірність безумовно перебійних років S_1 буде $S_1 = 1 - p_{\alpha-\beta}$. При $\alpha - \beta \leq K_{\min}$, або $\beta \geq \alpha - K_{\min}$, безумовно перебійних років не буде; також їх не буде і при $\beta \geq \alpha$, оскільки навіть якби стік взагалі був відсутній ($K = 0$), запаси водосховища повністю зможуть задовольнити потреби у воді α і імовірність перебійних років стане дорівнювати нулю, тобто $S_1 = 0$.

Другу крайню групу років в межах забезпеченості від 0 до p_α складають роки, у яких $K \geq \alpha$. Віддача α в такі роки повністю задовольняється стоком K і навіть є надлишки і, отже, вони не будуть

перебійними.

Між цими двома крайніми групами років з $K \geq \alpha$ і $K < \alpha - \beta$ є роки числом $N_2 = p_{\alpha-\beta} - p_\alpha$, для яких $\alpha > K > \alpha - \beta$. Можливість повного задоволення віддачі α в такі роки залежить від водності попередніх років. Якщо даному року передуватиме маловодний рік і водосховище виявиться спрацьованим настільки, що запасами, які залишилися, не покриється дефіцит $\alpha - K$ даного року, такий рік буде перебійним. Якщо ж водосховище в попередній рік спрацюється трохи або зовсім не спрацюється і запаси водосховища виявляться достатніми для покриття дефіциту даного року, такий рік буде не перебійним. Роки, що входять до групи N_2 , внаслідок невизначеності свого положення називаються умовно перебійними. Для того щоб визначити, яке число років цієї групи дасть перебіє сумісно з одним попереднім роком, необхідно побудувати криву забезпеченості сумарних величин стоку за дворіччя, що складаються з одного року групи N_2 і одного попереднього року.

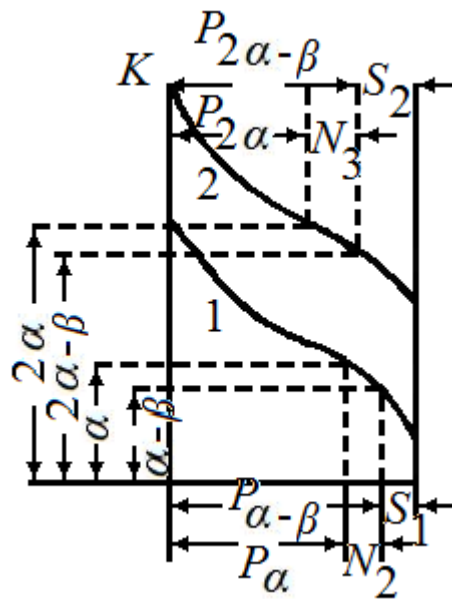


Рис. 3.3 – Схема розрахунку за методом С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля 1935 р.

Задача, таким чином, зводиться до побудови кривої забезпеченості величин стоку за дворіччя $K_1 + K_2$, з яких один (K_1) є будь-яким роком з групи N_2 і другий (K_2) – будь-яким роком основного ряду. Тобто, необхідно скласти початкову криву забезпеченості річних величин стоку (крива 1 на рис. 3.3) з відрізком тієї ж кривої в межах ординат від $K = \alpha$ до $K = \alpha - \beta$; при цьому абсциси цієї останньої кривої мають дорівнювати нулю при $K = \alpha$ і одиниці при $K = \alpha - \beta$. Щоб скласти вказані криві,

необхідно основу кривої N_2 розбити на s рівних інтервалів і на межах інтервалів визначити відповідні ординати $K_0, K_1 \dots K_s$. Далі, задаючись декількома значеннями сум 2 і використовуючи викладений вище спосіб розрахунку, визначають по початковій кривій (крива 1) для кожної з цих сум часткові забезпеченості p_0, p_1, \dots, p_s , а за (3.17) середнє зважені забезпеченості. В результаті одержимо криву 2 (рис. 3.3), яка і є шуканою кривою забезпеченості дворічних величин стоку: один рік з групи умовно перебієних років N_2 і один з основного ряду.

Піддамо аналізу величини стоку за дворіччя $K_1 + K_2$. Віддача за два роки дорівнює 2α . Дворіччя, в які $K_1 + K_2 < 2\alpha - \beta$, будуть безумовно перебієними. Число таких дворіч $S_2 = 1 - p_{2\alpha - \beta}$. Дворіччя, в які $K_1 + K_2 \geq 2\alpha$, сприятливі, оскільки віддача 2α цілком задовольняється стоком річки за два суміжні роки $K_1 + K_2$. Число таких дворіч $p_{2\alpha}$. Дворіччя числом $N_3 = p_{2\alpha - \beta} - p_{2\alpha}$, для яких $2\alpha > K_1 + K_2 > 2\alpha - \beta$ є умовно перебієними, оскільки якщо ним будуть передувати маловодні роки і водосховище спрацюється настільки, що запаси, які залишилися, не покриють дефіциту стоку $2\alpha - (K_1 + K_2)$, вони виявляться перебієними. У протилежному випадку дворіччя перебієними не будуть.

Визначене число безумовно перебієних дворіч S_2 приєднаємо до перебієного періоду S , а групу умовно перебієних дворіч N_3 знову досліджуємо, розглядаючи кожну з них спільно з одним попереднім роком основного ряду. Для цього будується крива забезпеченості трирічних величин стоку $K_1 + K_2 + K_3$, до складу яких входять дворіччя $K_1 + K_2$ з групи N_3 і один рік основного ряду.

Аналогічний аналіз кривої забезпеченості трирічних величин стоку дозволить визначити число безумовно перебієних триріч $S_3 = 1 - p_{3\alpha - \beta}$, число сприятливих триріч $p_{3\alpha}$ і число умовно перебієних триріч

$$N_4 = p_{3\alpha - \beta} - p_{3\alpha}. \quad (3.18)$$

Одержане число безумовно перебієних триріч S_3 також приєднаємо до перебієного періоду S , а групу умовно перебієних триріч N_4 знову досліджуємо у поєднанні з одним попереднім роком. Потім визначимо число безумовно перебієних чотирьохріч S_4 , число умовно перебієних чотирьохріч N_5 і так далі. Кожне нове число безумовно перебієних n -річ приєднаємо до перебієного періоду S і в результаті одержимо загальне число перебієних років, що дорівнює

$$S = S_1 + S_2 + \dots \quad (3.19)$$

Число перебієних років S_i із збільшенням числа років n швидко убуває, тому розрахунок може бути обмежений невеликим числом доданків.

Оскільки при побудові кривих забезпеченості величин стоку дворіч, триріч і т.д. використовується лише одна складова, а саме початкова крива забезпеченості однорічних величин стоку, входить з вагою одиниця (основа кривої дорівнює одиниці), а решта доданків з вагою меншою за одиницю – N_2, N_3, \dots , то взяті з креслення величини S_2, S_3, \dots і N_3, N_4, \dots відбивають не абсолютні (безумовні імовірності), а відносні числа (умовна імовірність) перебієних або умовно перебієних дворіч, триріч і т.д. Для того щоб одержати абсолютні значення цих величин, необхідно враховувати вагу вхідних доданків: для перебієних дворіч S_2 вага N_2 , тобто $S_2 N_2$, триріч S_3 вага N_2 і N_3 , тобто $S_3 N_2 N_3$, чотирьохріч S_4 вага N_2, N_3 і N_4 , тобто $S_4 N_2 N_3 N_4$ і т.д., а для умовно перебієних дворіч N_3 вага N_2 , тобто $N_3 N_2$, триріч N_4 вага N_2 і N_3 , тобто $N_4 N_2 N_3$, і т.д.

Тільки після врахування ваги доданків величини S_i і N_{i+1} будуть зіставні з відповідними величинами S_1 і N_2 й за виразом (3.19) можна буде визначити сумарне число перебієних років S .

Тобто забезпеченість гарантованої віддачі з водосховища α за числом безперебієних років (у відсотках) обчислимо як

$$p = 100(1 - S). \quad (3.20)$$

При практичному користуванні викладеним вище методом розрахунку багаторічного регулювання необхідно мати на увазі, що криві забезпеченості сумарного стоку z за дворіччя, триріччя і т.д. будуються не у всьому діапазоні його коливання, а лише в тій частині, яка являє практичну цікавість для розрахунку. А саме крива $K_1 + K_2$ будується в межах від $z_0 = 2\alpha$ до $z_s = 2\alpha - \beta$; крива $K_1 + K_2 + K_3$ – в межах від $z_0 = 3\alpha$ до $z_s = 3\alpha - \beta$ і т.д.

Для прикладу в табл. 3.2 наведені результати розрахунку за методом С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля 1935 р. при наступних даних: $\alpha = 0,90$, $\beta = 0,60$, $C_v = 0,35$ і $C_s = 2C_v = 0,70$.

В табл. 3.2 наведена послідовність і порядок розрахунку (обчислення для 4-7-річ не наводяться. Для них наводиться лише загальне число перебієних років – 4,2 %).

Таблиця 3.2 – Розрахунок перебіжних років

n	$n_{\alpha-\beta}$	$p_{n\alpha-\beta}$	n_{α}	$p_{n\alpha}$	Умовні імовірності, %		Безумовні імовірності, %	
					S_n	N_{n+1}	S_n	N_{n+1}
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,30	99,7	0,90	57,4	0,3	42,3	0,3	42,3
2	1,20	91,7	1,80	35,2	8,3	56,5	3,5	23,9
3	2,10	87,2	2,70	30,2	12,8	57,0	3,1	13,6
4-7							4,2	
8	6,60	85,5	7,20	28,5	14,5	57,0	0,2	0,8
							$\Sigma 11,3$	

В даному прикладі розрахунок закінчений при $n=8$, оскільки подальше S_i буде дуже малим. Сумарне число перебіжних років, таким чином, дорівнює

$$S = 11,3\%,$$

а забезпеченість гарантованої віддачі

$$p = 100 - 11,3 = 88,7\%.$$

Помилка у визначенні S , а отже, і p не може перевищувати числа умовно перебіжних n -річ, якими закінчується розрахунок, тобто в даному випадку не більше 0,8 %, чим можна знехтувати.

Якщо одержана забезпеченість p не відповідає заданої, розрахунок необхідно продовжити при змінених α або β до повного зближення p .

Враховуючи складність розрахунків за методом С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля 1935 р., Я.Ф. Плешковим були побудовані розрахункові графіки (номограми), які пов'язують багаторічну ємність водосховища β з коефіцієнтом регулювання α і коефіцієнтом мінливості річного стоку C_v при заданих значеннях забезпеченості: 75, 80, 85, 90, 95 і 97 %. Вказані графіки побудовані при найбільш поширеному співвідношенні між коефіцієнтами регулювання α в діапазоні від мінімального до максимального значення 0,90.

Також існує ще низка методик для розрахунків багаторічного регулювання стоку, а саме, метод А.Д. Саваренського, Г.П. Іванова, М.М. Милославського, О.Ш. Резниковського, І.Ф. Гуглія, Г.Г. Сванідзе.

3.4 Врахування корелятивного зв'язку між величинами річного стоку

Статистичні методи розрахунку багаторічного регулювання, що розглядалися вище, засновані на тому положенні, що чергування років різної водності підпорядковані закону випадковості, тобто що між величинами стоку за суміжні роки відсутній зв'язок. В той же час в багаторічних коливаннях стоку простежується циклічність, що характеризується чергуванням груп багатоводних і маловодних років. В тривалості і чергуванні цих угруповань, однак, важко виявити скільки-небудь чітко виражену періодичну закономірність або достатньо певний зв'язок з будь-яким періодичним фактором, що визначає багаторічний хід стоку. За наявності вказаної циклічності буде більш імовірним, що, наприклад, за маловодним роком буде також більш-менш маловодний, ніж відразу багатоводний рік, і навпаки. З цього витікає, що стік наступного року перебуває в деякій корелятивній залежності від стоку попереднього року. Причиною залежності стоку наступного року від стоку попереднього року, мабуть, є наявність інерції в ході гідрологічних явищ, обумовлена зміною запасів води на водозборі (у водоймах, підземних вод і т.д.), більш-менш значні залишки яких переходять від року до року, а також наявність інерції в ході кліматичних факторів тощо.

Тіснота зв'язку між суміжними величинами стоку оцінюється **коефіцієнтом кореляції**. Чим різкіше виражена циклічність в ході стоку, тим тісніший зв'язок між величинами стоку двох сусідніх років, тобто тим ближчий до одиниці коефіцієнт кореляції. Має місце, але слабкіший, зв'язок стоку даного року із стоком року через один, через два і т.д. При цьому з віддаленням корельованих років зв'язок стає все слабкішим.

П.А. Єфімович показав, що за наявності циклічності в коливаннях стоку і супутньому їй корелятивному зв'язку між величинами річного стоку коефіцієнт мінливості для ряду, складеного із середніх модульних коефіцієнтів стоку за n -річчя має бути виражений наступною складною залежністю

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} [r_1(n-1) + r_2(n-2) + r_3(n-3)...]}, \quad (3.21)$$

де r_1 – коефіцієнт кореляції між величинами стоку за суміжні роки;

r_2 – коефіцієнт кореляції для років через один;

r_3 – коефіцієнт кореляції для років через два і т.д.

Зважаючи на відносно малість коефіцієнтів r_2 , r_3 і т.д. їх можна виключити. Тоді вираз спрощується таким чином:

$$C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} r_1 (n-1)}. \quad (3.22)$$

Вираз (3.22) свідчить про те, що величина C_v^n при врахуванні корелятивного зв'язку виявляється більшою, ніж без врахування цього зв'язку; тому і необхідний об'єм водосховища повинен вийти більшим, ніж при прийнятті коефіцієнта мінливості за формулою (3.11). Різниця в об'ємах водосховища при високих значеннях α і порівняно великих коефіцієнтах кореляції може досягати 50-70 % і навіть більше.

Дослідження С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля по 37 річках із загальним числом років спостережень 2141 показали, що коефіцієнт кореляції між стоком суміжних років в середньому складає 0,24, а по окремих річках коливається від 0 до 0,45.

Оскільки розрахункові графіки Іванова, в яких врахований вплив зв'язку між стоком суміжних років з середньою величиною коефіцієнта кореляції $r_1 = 0,19$, збігаються з графіками Плешкова, побудованими без її врахування, наявність зв'язку, що характеризується коефіцієнтом кореляції до 0,2, практично не впливає на величину необхідної багаторічної складової ємності водосховища і її можна не враховувати в розрахунках регулювання. За наявності ж більш тісного зв'язку, неврахування корелятивного зв'язку між річними величинами стоку може привести до помітних похибок, що не можна не враховувати. Ця похибка зростає з підвищенням мінливості стоку, ступеня багаторічного регулювання і розрахункової забезпеченості.

С.Н. Крицький та М.Ф. Менкель розробили метод врахування корелятивного зв'язку між величинами річного стоку при розрахунку багаторічного регулювання стоку.

Із зіставлення графіків, побудованих І.В. Гуглієм за вказаним методом при $r = 0,30$, з графіками Я.Ф. Плешкова видно, що, наприклад, при мінливості річного стоку 0,40, забезпеченості 97 % і багаторічній ємності 1,6 похибка у визначенні ємності від неврахування зв'язку між величинами річного стоку складає 6,5 %, а при мінливості стоку 0,80 тій же забезпеченості 97 % і багаторічній ємності 1,2 – вже 25 %. Графіки Гуглія мають значення при розрахунках багаторічного регулювання стоку річок посушливої зони, де дані коефіцієнти кореляції досягають величини порядку 0,30, що якраз враховується цими графіками.

Питання для самоперевірки

1. Поясніть в чому полягає відмінність між методами розрахунку регулювання стоку по календарних рядах і методами математичної

статистики.

2. Назвіть основні розрахункові величини, що використовуються при обчисленнях за статистичними методами.

3. В чому полягає сутність розрахунків за першим методом С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля?

4. Яким чином визначається максимальний дефіцит стоку?

5. Охарактеризуйте основні принципи статистичного розрахунку регулювання стоку за другим методом С.Н. Крицького та М.Ф. Менкеля.

6. Яким чином в розрахунках регулювання стоку враховується корелятивний зв'язок?

4 РОЗРАХУНКИ РЕГУЛЮВАННЯ СТОКУ ПО КАЛЕНДАРНИХ ГІДРОЛОГІЧНИХ РЯДАХ НА ЗМІННУ ВІДДАЧУ

4.1 Основні положення

Більш прості задачі регулювання, характеризуються постійністю в часі споживаних витрат води. У сучасній же практиці водогосподарського використання великого поширення набули задачі, коли споживана витрата змінюється в часі, підвищуючись при великих наявних запасах води у водосховищі і великому припливу до нього і знижуючись при малих запасах води і малому припливу.

Можливість реалізації змінної витрати води визначається різними причинами. Перша з них полягає в тому, що при комплексному використанні водотоку до складу споживачів зазвичай входять підприємства або цілі галузі народного господарства, що вимагають воду з різною забезпеченістю. В цьому випадку основною задачею регулювання стає підтримка гарантованої віддачі для найбільш відповідального споживача, тобто з найбільш високою забезпеченістю. Водовіддача решті споживачів здійснюється з меншою забезпеченістю. Іншою причиною є робота водогосподарської установки в системі з іншими джерелами води або енергії. У таких випадках при підвищенні віддачі одного джерела знижується віддача іншого джерела, чим підтримується рівновага віддачі по системі в цілому.

Типовими установками із змінною віддачею є гідроелектричні станції, що вливають свою енергію в енергетичну систему. Звичайним явищем для вказаних ГЕС буде підтримка в маловодні періоди гарантованої потужності з підвищенням її в періоди надлишкового стоку до максимально можливої.

Змінна віддача з водосховища може бути реалізована також і при

водотранспортному і частково іригаційному використанні водотоку. Водний транспорт, наприклад, орієнтуючись в основному на величину гарантованої витрати і гарантійну глибину суднового ходу, що визначається ним, може ефективно використовувати підвищені витрати і глибини, здійснюючи операції по перевезеннях (вантажів і пасажирів) з більшим завантаженням судів при великому їх осіданні. При іригаційному використанні підвищену водовіддачу з водосховища можна реалізувати на збільшення поливних норм найбільш вологолюбних рослин для підвищення врожайності.

Реалізація змінної віддачі має величезне господарське значення, оскільки порівняно невеликим водосховищем досягається високе забезпечення мінімуму віддачі, а за рахунок посиленого споживання води в багатоводні періоди здійснюється високе спільне використання стоку.

Нехай водосховищем забезпечується мінімальна величина зарегульованої витрати Q_p , а максимальна продуктивність споживаючих воду установок дорівнює Q_B . Тоді корисна віддача, що реалізовується, буде перебувати в діапазоні від Q_p до Q_B . Якщо спробувати скласти план роботи цього водосховища, який дозволяє з найбільшим ефектом використовувати ресурси водотоку, то очевидно, задачею такого плану буде забезпечення подання Q_p із заданою забезпеченістю p і найбільш повне загальне використання стоку річки. Такий план регулювання при відомому ході стоку за тривалий період можна намітити, застосовуючи так звану **схему регулювання на найбільше вирівнювання стоку**.

4.2 Схема регулювання на найбільше вирівнювання стоку

Схемою регулювання на найбільше вирівнювання стоку називають такий режим роботи водосховища заданої ємності, при якому мінімум зарегульованої витрати досягає найбільш можливого значення, а максимум – найменшого. Одночасно необхідно, щоб число градацій зарегульованих витрат всередині одержаного діапазону від мінімуму до максимуму було доведено до найменшого значення. Інакше кажучи, ця схема регулювання дає уявлення про теоретично можливе граничне вирівнюванні стоку, що досягається при тих або інших розмірах корисної ємності водосховища.

Сутність побудови такої схеми зводиться до наступного.

Нехай буде заданий стік за деякий період часу у вигляді інтегральної кривої в косокутних координатах (рис. 4.1, крива 1) і розміри корисної ємності водосховища V .

На відстані по вертикалі, що дорівнює ємності водосховища, побудуємо контрольну інтегральну криву, паралельно основної і вниз від

неї. Всередині поля, жорстко обмеженого кресленнями інтегральних кривих, побудуємо дотичні до максимумів нижньої і мінімумів верхньої кривих при спрацювання водосховища і до мінімумів верхньої і максимумів нижньої кривих при його наповненні. Виконуючи принцип найбільшого вирівнювання стоку, необхідно прагнути до того, щоб в спрацювання і наповнення водосховища кожного разу включалися якомога триваліші періоди. Це означає, що при побудові тієї або іншої дотичної, точки дотику її з інтегральними кривими мають бути віддалені одна від одної на максимальну відстань, яка допускається в даних умовах (тобто пропускаючи поряд розташовані мінімуми і максимуми та виключаючи перетин інтегральних кривих).

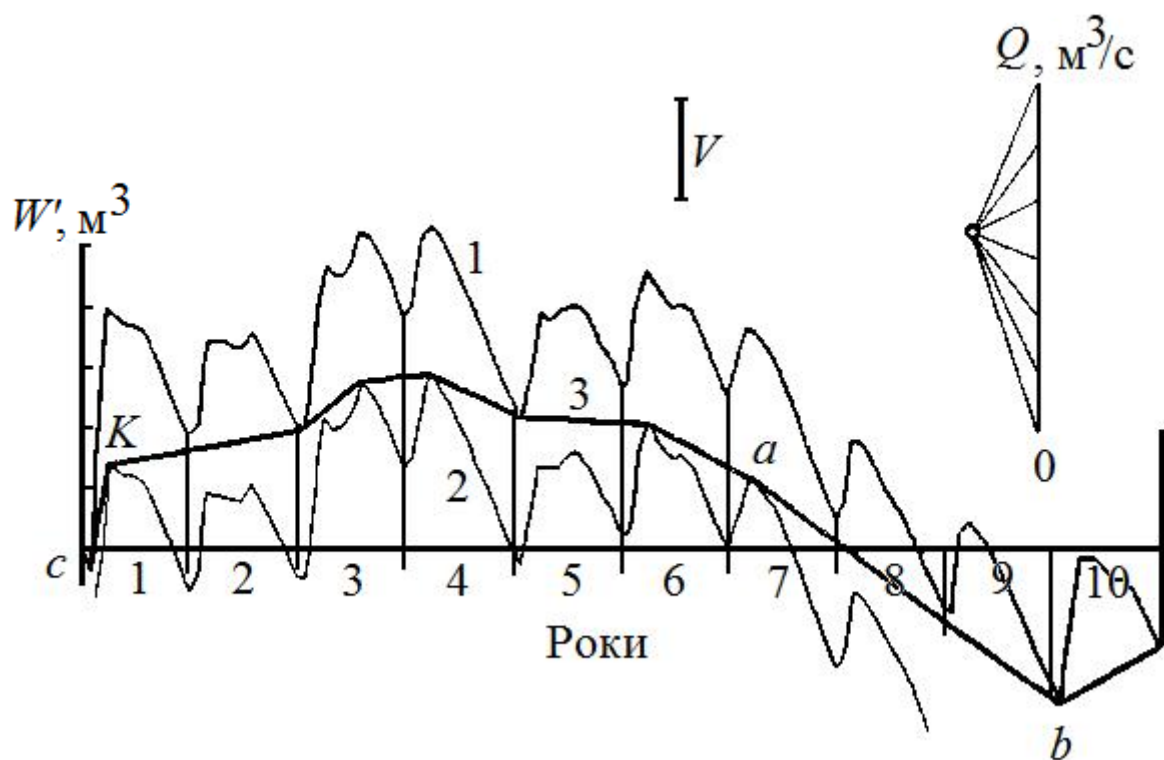


Рис. 4.1 – Розрахунки багаторічного регулювання за схемою на найбільше вирівнювання стоку

Умовні позначення: 1 – інтегральні криві природного стоку;
 2 – контрольна крива;
 3 – крива зарегульованого стоку

Неважко побачити, що нахил дотичної ab , побудованої в межах найбільш тривалого і глибокого маловоддя, відповідає мінімальній зарегульованій витраті Q_p , яка при заданих розмірах водосховища є найбільшою з можливих в періоді маловоддя. Нахил дотичної cK , накресленої в межах найбільш багатоводного періоду часу, відповідає

максимальній зарегульованій витраті Q_{\max} , яка при заданих розмірах водосховища є найменшою з можливих в період багатководдя. Нахил інших дотичних характеризує проміжні значення зарегульованих витрат – між мінімальним Q_p і максимальним Q_{\max} .

Безперервний ланцюг дотичних, позначений на рис. 4.1 індексом 3, і є шуканою лінією (інтегральною кривою) зарегульованих витрат за схемою на найбільше вирівнювання стоку.

Цю ж задачу можна вирішити і дещо іншим шляхом.

У виступаючих точках верхньої (мінімумах) і нижньої (максимумах) інтегральних кривих $a, b, c, K...$ наколемо шпильки, по яких натягнемо тонку нитку із найменшою кількістю зламів. Очевидно, натягнута вказаним способом нитка збігається з раніше побудованими дотичними і, отже, одержимо рішення, що є однаковим з попереднім. Тому викладений прийом побудови зарегульованого режиму за схемою на найбільше вирівнювання стоку називається «**правилом натягнутої нитки**».

У прикладі, показаному на рис. 4.1, виконані розрахунки за схемою на найбільше вирівнювання стоку при багаторічному регулюванні. Таким же шляхом аналогічна задача вирішується і при сезонному регулюванні стоку.

Побудувавши контрольну інтегральну криву 2 на відстані заданої ємності водосховища (рис. 4.2), як і раніше побудуємо дотичні до нижньої і верхньої інтегральних кривих (ab) – при спрацюванні водосховища в маловодну частину року і до верхньої і нижньої кривих (cK) – при наповненні водосховища в багатоводну частину року. В результаті одержимо безперервну лінію зарегульованих витрат, яка в межах інтервалів часу роботи водосховища при спрацьованій ємності (bc) збігається з верхньою інтегральною кривою, а в межах інтервалів часу при доверху заповненому водосховищі (Ka) – з нижньою інтегральною кривою.

На відміну від задачі регулювання, коли незалежно від стану наповнення водосховища і припливу до нього регулюється постійна витрата Q_p , внаслідок чого повне спрацювання водосховища настає дуже рідко, в даній схемі, що передбачає при сезонному регулюванні щорічне спрацювання (і наповнення) ємності, мінімальна зарегульована витрата Q_p має місце лише в найбільш маловодному по межені року (рік 7), а в решту років зарегульована витрата при спрацюванні водосховища $Q > Q_p$. Максимальна зарегульована витрата при наповненні водосховища Q_{\max} одержується в найбільш багатоводному по водопіллю році (рік 1), а в решту років $Q < Q_{\max}$.

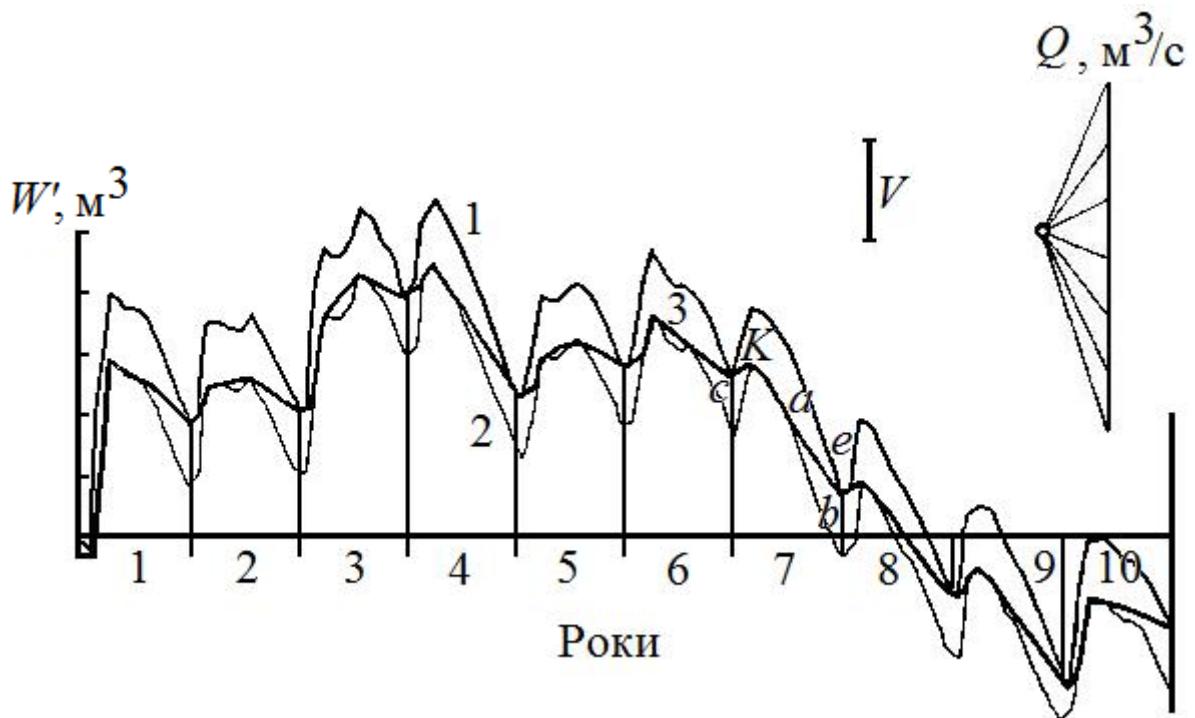


Рис. 4.2 – Розрахунки сезонного регулювання за схемою на найбільше вирівнювання стоку

- Умовні позначення:** 1 – інтегральні криві природного стоку;
 2 – контрольна крива;
 3 – крива зарегульованого стоку

Відносно одержуваної максимальної зарегульованої витрати як при багаторічному, так і при сезонному регулюванні, якщо $Q_{\max} > Q_B$, дана схема не має сенсу, оскільки допускає холості скиди із самого початку заповнення корисної ємності водосховища, що нераціонально.

У такому разі, очевидно, необхідно внести коректив, за яким в період наповнення водосховища величина максимальної регульованої витрати повинна задаватися не більшою за витрату максимальної продуктивності водоспоживаючих установок Q_B , і лише після заповнення водосховища здійснюються холості скиди, коли витрати припливу перевищують Q_B . При регулюванні на витрату $Q_B < Q_{\max}$ заповнення корисної ємності водосховища відбуватиметься в більш короткі терміни, ніж при регулюванні на витрату Q_{\max} , що відповідає більш правильному веденню водного господарства, особливо при енергетичному використанні, якщо водосховище є верхнім б'єфом і його рівнями визначаються існуючі напори ГЕС.

З урахуванням вказаного корективу дана схема, яку також можна назвати схемою регулювання на гнучкий графік споживання, навіть при

низьких значеннях α забезпечує високе спільне використання стоку, тоді як схема регулювання на постійну віддачу α характеризується більш низьким використанням стоку.

Дійсно, при регулюванні за останньою схемою величина гарантованої витрати Q_p визначається по стоку заданої забезпеченості; тому при підвищеному припливі в період спрацювання водосховища воно опиниться неповністю спорожненим на початок багатоводної частини наступного водогосподарського року (сезонне регулювання) або на початок багатоводного періоду, наступного за маловодним (багаторічне регулювання). Об'єм води, що залишився в неспрацьованій частині ємності, буде втрачений при наповненні водосховища і на стільки ж будуть збільшені холості скиди.

Схема регулювання на найбільше вирівнювання стоку, не зважаючи на великі переваги, має головним чином теоретичне значення, оскільки виходить з умови, що майбутній хід стоку відомий заздалегідь. Практичне запровадження в життя цієї схеми в умовах реальної експлуатації водосховища неможливо внаслідок відсутності відомостей про майбутній на тривалий термін вперед хід стоку.

4.3 Диспетчерські графіки

За наявності точного передбачення стоку в хронологічній послідовності завжди можна скласти такий план роботи водосховища, який би задовольняв вимоги всіх прикріплених до водосховища споживачів в міру наявних водних ресурсів. За цих умов виявилось б можливим завчасно спорожнювати водосховище перед настанням багатоводних періодів і економити воду в очікуванні маловоддя, тобто виконувати регулювання, тотожне схемі на найбільше вирівнювання стоку. Ефект роботи водосховища в цьому випадку був би найбільшим.

Практично, однак, прогнозування стоку, не враховуючи передбачення типового його внутрішньорічного розподілу, обмежується невеликою завчасністю і порівняно невисокою точністю, через що теоретично можливий ефект роботи водосховища не піддається повній реалізації. Тому відсутність конкретного знання припливу приходить до відшкодовувати складанням спеціальних правил управління роботою водосховища, втілених в **диспетчерські графіки**.

Диспетчерські графіки будуються на основі аналізу роботи водосховища в умовах гідрологічного режиму, охопленого спостереженнями за попередній період і, отже, ними враховуються властиві кожному водотоку особливості. За основний аргумент в диспетчерських графіках приймається **досягнуте наповнення водосховища**, в залежності від якого і виконується подача води

споживачам. При експлуатації водосховища використовуються також дані поточних прогнозів, які дозволяють коректувати рішення, що даються диспетчерськими графіками, і тим самим сприяють підвищенню ефекту регулювання.

В задачу диспетчерських графіків входить забезпечення одержання як можна більшого ефекту від водосховища в реальній обстановці з урахуванням можливого передбачення стоку. До основних показників, що визначають найбільший ефект роботи водосховища, необхідно віднести безперебійну в межах розрахункової забезпеченості p подачу споживачам гарантованої витрати Q_p і максимальне спільне використання стоку.

Зазвичай диспетчерські графіки будуються в координатах час (вісь абсцис) – наповнення водосховища (об'єм або висотна відмітка горизонту – вісь ординат). Ця форма графіків є основною і якнайповнішою, тому що ними регламентується подача води з водосховища в різних умовах водності: нормальній, підвищеній і зниженій.

Дуже часто в практиці знаходить застосування і інша форма диспетчерських графіків – в координатах величин зарегульованих витрат (вісь абсцис) і наповнень водосховища (вісь ординат). Проте такі графіки будуються лише для регламентації витрачання надлишків води, що утворюються у водосховищі, у зв'язку з надходженням припливу, який перевищує розрахунковий.

Диспетчерські графіки, побудовані в координатах час – наповнення водосховища, являють собою ряд ліній, розмежовуючих зони, в межах яких водоспоживачеві подається певна витрата (рис. 4.3 а-в). На цих графіках виділяються такі зони роботи водосховища:

1. **Гарантованої** віддачі Q_p .
2. **Підвищеної** віддачі в діапазоні $Q_B > Q > Q_p$.
3. **Повної підвищеної** віддачі Q_B .
4. **Урізаної (обмеженої)** віддачі $Q < Q_p$.

Диспетчерські графіки в координатах витрата – наповнення водосховища складаються з серії променів, що йдуть від вертикальної лінії з абсцисою, яка дорівнює гарантованій витраті (рис. 4.3 г). Кожний з вказаних променів пов'язує наповнення водосховища на контрольну дату, наприклад на 1-е число місяця, з величиною витрати, що подається водоспоживачеві впродовж подальшого інтервалу часу до наступної контрольної дати. На диспетчерських графіках даної форми виділяються три зони: **гарантована, підвищена і повна підвищена віддача**.

Лініями, що розмежовують на диспетчерських графіках у координатах час – наповнення основних зон спрацювання водосховища є:

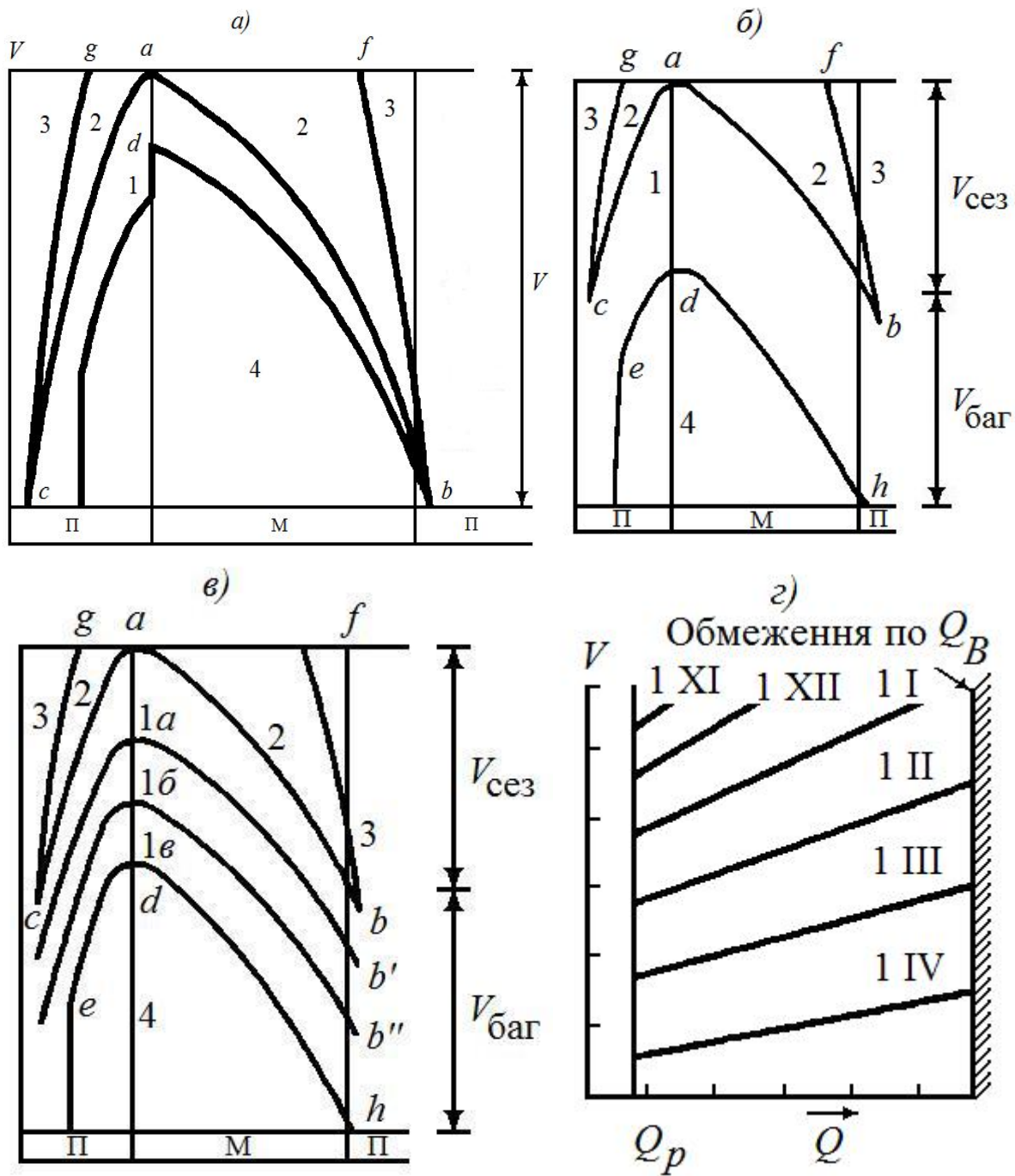


Рис. 4.3 – Схеми диспетчерських графіків

- Умовні позначення:** *a* – сезонного регулювання;
б – багаторічного регулювання при одному ступені гарантованої віддачі;
в – багаторічного регулювання при трьох ступенях гарантованої віддачі;
г – регламентація використання надлишків

А. **Верхня протиперебійна**, що відокремлює зону гарантованої віддачі Q_p від зони підвищеної віддачі в діапазоні $Q_B > Q > Q_p$.

Б. **Нижня протиперебійна**, що відокремлює зону гарантованої віддачі Q_p від зони урізаної віддачі $Q < Q_p$.

В. **Протискидна**, відокремлює зону підвищеної віддачі від зони повної підвищеної віддачі Q_B .

Кожна з вказаних ліній складається з двох гілок: **наповнення і спорожнення (спрацювання)** водосховища.

Відповідно до умов роботи водосховища при сезонному і багаторічному регулюванні, коли в першому випадку цикл наповнення і спорожнення водосховища замикається в межах одного року, а в другому – в межах ряду років, положення верхньої протиперебійної лінії на диспетчерських графіках буде різним.

При сезонному регулюванні ця лінія розташовується в межах всієї корисної ємності водосховища, а при багаторічному – лише в межах сезонної складової, оскільки тільки ця частина ємності призначається для щорічного передводопільного спрацювання. Нижня протиперебійна лінія при сезонному регулюванні також розташовується в межах всієї ємності водосховища, а при багаторічному регулюванні в основному в межах багаторічної складової.

Гілка наповнення верхньої протиперебійної лінії при сезонному регулюванні (рис. 4.3 а, лінія *ca*) будується з метою забезпечення заповнення до кінця водопілля всієї корисної ємності водосховища в маловодні розрахункові роки. Та ж гілка наповнення верхньої протиперебійної лінії при багаторічному регулюванні (рис. 4.3 б, лінія *ca*) будується з метою забезпечення до кінця водопілля заповнення сезонної складової ємності в році, який передує критичному маловоддю, впродовж якого спрацьовується багаторічна складова ємності (*bh*).

Гілка наповнення нижньої протиперебійної лінії при сезонному регулюванні не будується по наступних причинах. При неглибокому сезонному регулюванні внаслідок малих розмірів водосховища його наповнення у водопілля не викликає труднощів.

При глибокому ж сезонному регулюванні уповільнення наповнення водосховища в порівнянні із заповненням, лімітується верхньою протиперебійною лінією, та означатиме, що надалі неможливо підтримувати гарантовану віддачу і необхідно перейти до урізаної віддачі, яка регламентується відповідною зоною диспетчерського графіка (рис. 4.3 а, зона 4).

Гілка наповнення нижньої протиперебійної лінії при багаторічному регулюванні (рис. 4.3 б і в, лінія *ed*) будується для забезпечення заповнення тієї частини ємності водосховища, яка необхідна для підтримки гарантованої віддачі в рік, наступний за закінченням

критичного маловоддя.

Очевидно, гілки наповнення верхньої і нижньої протиперебійних ліній мають бути орієнтовані на зосереджене (різке) водопілля розрахункових років, оскільки верхня гілка обмежує зону гарантованої віддачі зверху (зону 1) і, запобігає необґрунтованому переходу на підвищену віддачу (в зону 2) при сповільненому ході наповнення водосховища, а нижня гілка обмежує зону гарантованої віддачі знизу і, отже, запобігає необґрунтованому переходу до урізаної віддачі (в зону 4).

Призначенням гілок спорожнення верхньої і нижньої протиперебійних ліній при всіх масштабах регулювання (рис. 4.3 а, лінії ab і db і рис. 4.3 б і в, лінії ab і dh) є жорстко обкреслити зону гарантованої віддачі (зону 1) при спрацюванні водосховища і запобігти необґрунтованому переходу як в зону підвищеної (2), так і в зону урізаної віддачі (4). Ці гілки спорожнення з метою запобігання швидкого спрацювання водосховища повинні будуватися по припливу, що знижується до кінця спорожнення.

Гілка наповнення протискідної лінії як при сезонному, так і при багаторічному регулюванні (лінії gc) має однаковий сенс – в її задачу входить запобігти надмірно швидкому наповненню водосховища з метою звести до мінімуму або повністю усунути холості скиди.

Гілка спорожнення протискідної лінії (лінії fb) забезпечує передводпільне спрацювання при сезонному регулюванні всієї корисної ємності водосховища і при багаторічному – сезонної складової і тим самим запобігає непередбачені скиди при наповненні водосховища в наступному водогосподарському році.

Таким чином, зона гарантованої віддачі (зона 1) при сезонному регулюванні затиснута у відносно вузькі межі. При багаторічному ж регулюванні межі цієї зони значно розширюються і чим вищий ступінь регулювання, тим ширшою є зона.

У зоні 2 величина віддачі удержується в інтервалі від гарантованої Q_p до максимальної Q_B . З метою більш суворої регламентації підвищеної віддачі і поступового її збільшення ця зона у свою чергу поділяється на підзони з певними ступенями віддачі або для неї складається спеціальний диспетчерський графік в координатах витрат і наповнення водосховища.

У зоні 3, розташованій вище протискідної лінії, водосховище працює з віддачею Q_B .

У зоні 4, обмеженої зверху нижньою протиперебійною лінією, що є зоною із неповним задоволенням потреб у воді, внаслідок настання перебіжного періоду за межами розрахункової забезпеченості віддача знижується. В цій зоні виділяється ряд ступенів для пом'якшення переходу від гарантованої до урізаної віддачі, що поступово знижується.

Схема диспетчерського графіка при багаторічному регулюванні на

задоволення декількох споживачів із різним відсотком забезпеченості гарантованої віддачі в загальні сумах із схемою при одному значенні гарантованої віддачі. Її відмінність від останньої полягає в тому, що зона гарантованої віддачі (зона 1), що обкреслюється протиперебійними лініями (верхньою і нижньою), поділяється на підзони 1 а, 1 б і т.д. (рис. 4.3 в) за числом ступенів гарантованої віддачі. Зони ж підвищеної віддачі (2 і 3), як і зона урізаної віддачі (4), мають однакове значення з відповідними зонами на диспетчерському графіку при одному ступені гарантованої віддачі.

Схема диспетчерського графіка, побудова якого пов'язується, із реалізацією надлишків зображена на рис. 4.3 г.

У розглянутих схемах диспетчерських графіків приймається, що корисна ємність водосховища цілком призначена для підвищення мінімального стоку річки і збільшення ступеня його використання, внаслідок чого холості скиди припускалися лише при повністю наповненому водосховищі.

Проте в деяких випадках сезонного регулювання, при відповідних співвідношеннях між ємністю і стоком, та у всіх випадках багаторічного регулювання одночасно вирішується і інша проблема водного господарства – трансформація високого стоку з метою зниження максимальних витрат води, що пропускаються в нижній б'єф. При цьому на річках з водопіллями, оскільки час настання їх в загальні піддається передбаченню, вказана трансформація здійснюється тією ж ємністю водосховища, якій відводиться роль внутрішньорічного регулювання стоку, - повною ємністю при сезонному регулюванні і сезонною складовою при багаторічному. У тих же випадках, коли допускається форсування рівня верхнього б'єфа при пропуску катастрофічного водопілля, в трансформації приймає також участь і призма форсування. Тоді холості скиди можуть починатися з різних рівнів водосховища від спороженого (при багаторічному регулюванні – тільки в частині сезонної складової) до наповненого (останнє збігається з прийнятими положеннями в схемах диспетчерських графіків, що розглядалися вище).

У вказаних випадках участі водосховища в зрізанні водопіль і паводків диспетчерські графіки, що містять правила корисного витрачання води, доповнюються лініями, які регламентують хід наповнення водосховища і роботу отворів для холостого скиду витрат. Такими лініями є **протиаварійні** для різного числа повністю відкритих скидних отворів.

При побудові диспетчерських графіків вважаються заданими такі початкові дані і положення:

1) основні характеристики плану водогосподарського використання (розмір гарантованої віддачі Q_p , розподіл її протягом року і її забезпеченість p ; сумарна продуктивність водоспоживаючих установок Q_B ; масштаби здійснюваного регулювання – сезонне або багаторічне,

глибина цього регулювання та ін.);

2) гідрологічна характеристика водотоку в створі регулюючої споруди за весь період спостережень;

3) дані про очікувані зміни в гідрологічному режимі водотоку у зв'язку з діяльністю людини, перетворюючою стік;

4) характеристика очікуваних прогнозів стоку – завчасність, точність;

5) розміри корисної ємності водосховища з виділенням (при багаторічному регулюванні) сезонної і багаторічної складових, відмітки НПП і МО водосховища.

При розробці диспетчерських графіків так само, як і при розрахунку сезонної ємності, необхідно рік ділити на фази, в межах яких відбувається спрацювання або наповнення сезонної ємності водосховища.

У загальному випадку спрацювання водосховища починається з моменту появи на спаді гідрографа водопілля витрати, що дорівнює зарегульованій, і закінчується у момент появи на підйомі водопілля, яке настає за меженню, витрати, що також дорівнює зарегульованій. У відповідних точках зрівнювання витрат припливу на підйомі і спаді водопілля з регулюючими витратами розпочинається і закінчується наповнення водосховища.

Тривалість спрацювання і наповнення водосховища, а звідси і тривалість відповідних фаз залежить від масштабів здійснюваного регулювання. Чим вищий ступінь регулювання, тим тривалішими є ці фази.

Після поділу року на фази визначаються розрахункові елементи для побудови протиперебівної лінії гілок спрацювання і наповнення водосховища. Додатково підлягають виділенню фази спрацювання і наповнення для побудови протискідної лінії.

Виділення фаз здійснюється в жорстких календарних межах, орієнтуючись на середні дати. При цьому залежно від ступеня докладності розрахунку і початкових гідрологічних даних межі фаз призначаються з точністю до п'яти днів, декади або місяця. Найчастіше межі фаз поєднуються з початком місяців. При виділенні фаз необхідно прагнути до того, щоб хвилі водопіль (або паводків) всіх років були включені у фазу наповнення водосховища.

Надалі підлягають врахуванню і крайні межі фаз шляхом розглядання ходу стоку по декадних, п'ятиденних або добових витрат за характерні роки.

Жорстко закріпивши календарні межі фаз, необхідно виконати статистичну обробку стокових даних по фазах за наявний період спостережень і визначити відповідні параметри: середні величини фазового стоку та коефіцієнти мінливості та асиметрії.

Розрахунок і побудова елементів диспетчерських графіків

розпочинається з гілки спрацювання верхньої протиперебійної лінії, оскільки при такому порядку розрахунку, окрім основної задачі – побудови протиперебійної лінії, вирішується і інше питання – уточнюються розміри сезонної ємності водосховища, заздалегідь встановлені за формулами. Потім розраховується решта елементів, що відносяться як до гілки спрацювання, так і до гілки наповнення.

Елементи диспетчерських графіків одержуються побудовою огинаючих відповідних ліній спрацювання і наповнення водосховища, що відносяться до ряду реальних характерних років. Стік цих років заздалегідь наводиться до розрахункових величин. При такій побудові елементів диспетчерських графіків враховується найбільш не вигідний розподіл стоку всередині року або сезону, завдяки чому перехід до підвищеної або урізаної віддачі може бути здійснений лише за наявності відповідно великих або малих запасів води у водосховищі.

Розраховані і побудовані вказаним шляхом окремі елементи зводяться в єдиний диспетчерський графік, на підставі якого здійснюються розрахунки регулювання і експлуатація водосховища.

У разі енергетичного використання водотоку і якщо водосховище є верхнім б'єфом ГЕС, при побудові диспетчерських графіків враховуються топографічні особливості водосховища і гідравлічні характеристики нижнього б'єфа ГЕС, що визначають напір, який діє на установці.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягає основна сутність розрахунків регулювання по календарних рядах на змінну віддачу?
2. Поясніть основні положення схеми регулювання на найбільше вирівнювання стоку.
3. Що називається диспетчерським графіком управління роботою водосховища?
4. Які схеми диспетчерських графіків Ви знаєте?
5. Які зони і лінії роботи водосховища Ви можете назвати? Що вони характеризують?

5 ВОДНОЕНЕРГЕТИЧНІ РОЗРАХУНКИ

5.1 Основні положення

Водноенергетична установка використовує механічну роботу (енергію) потоку, яка виробляється при падінні води з верхнього б'єфа в нижній, і перетворює її в електричну енергію. Отже, щоб стало можливим

використання енергії потоку, необхідно в місці споруди гідроелектричної станції (ГЕС) створити зосереджене падіння, тобто утворити різницю рівнів води вище і нижче за станцію – напір H .

Існує два основних типи ГЕС – пригребельні і дериваційні. На пригребельних напір створюється утворенням греблі безпосередньо в місці розташування ГЕС. На дериваційних гребля влаштовується вище за течією, а вода до ГЕС підводиться спеціальним трактом (відкритим каналом, тунелем або трубопроводом). В першому типі ГЕС перепад створюється тільки підпором природних рівнів водотоку греблею, в другому – частково греблею і частково падінням річки, в обхід якого влаштовується тракт, що підводить воду.

Вода, падаючи з висоти верхнього б'єфа і пройшовши через турбіну, вироблятиме механічну роботу, яка дорівнює γQH , кгм/с, де γ – маса 1 м^3 води в кілограмах.

Технічними одиницями потужності, тобто роботи, що здійснюється в одиницю часу, є: $1 \text{ кВт} = 102 \text{ кгм/с}$.

Таким чином, потужність води, що розвивається, Q , $\text{м}^3/\text{с}$, падаючи з висоти H , м, складатиме

$$N_0 = \frac{\gamma QH}{102}, \text{ кВт}, \quad (5.1)$$

або, оскільки $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$,

$$N_0 = 9,81QH, \text{ кВт}. \quad (5.2)$$

Внаслідок наявності гідравлічних і механічних втрат напору в турбіні потужність, що віддається на валу турбіни, буде менша теоретичної. Втрати потужності в турбіні враховуються коефіцієнтом корисної дії генератора η_m . Тоді вираз потужності на валу турбіни буде виглядати наступним чином:

$$N_0 = 9,81QH\eta_m, \text{ кВт}. \quad (5.3)$$

Механічна потужність турбіни перетворюється в електричну за допомогою генератора, який сполучений із турбіною. У самому генераторі також мають місце втрати потужності, які оцінюються коефіцієнтом корисної дії генератора η_e . В такому випадку потужність ГЕС, що віддається з шин генератора, буде дорівнювати

$$N = 9,81QH\eta_m\eta_e, \text{ кВт}. \quad (5.4)$$

На сучасних крупних гідроелектростанціях коефіцієнти корисної дії агрегатів високі і коливаються в діапазоні: для турбін $\eta_m = 0,85-0,95$, для генераторів $\eta_g = 0,96-0,98$.

Сумарною характеристикою роботи ГЕС за будь-який період є вироблення електричної енергії в кіловатах. Енергія, що виробляється, визначається з виразу

$$E = \int_0^t N dt, \text{ кВт-г}, \quad (5.5)$$

який для практичних розрахунків замінюється

$$E = \sum_0^t N \Delta t, \text{ кВт-г}, \quad (5.6)$$

N – середня потужність в інтервалі Δt , кВт;

Δt – розрахунковий інтервал часу в годинах, на який розбитий весь розглядуваний період t , г.

Характерною величиною, що визначає сумарний ефект роботи електростанції, є середнє річне вироблення енергії

$$E = \bar{N} \cdot 8766, \text{ кВт-г}, \quad (5.7)$$

де \bar{N} – середня багаторічна потужність, кВт;

8766 – середнє число годин за рік.

Як впливає з формули (1.9), потужність ГЕС залежить від витрати, напору і коефіцієнтів корисної дії турбін і генераторів.

Якщо в розрахунок ввести середні зважені значення коефіцієнтів корисної дії, потужність ГЕС залежатиме лише від витрати і напору. Величини використовуваних на ГЕС витрат залежать від режиму водотоку, характеру здійснюваного водосховищем регулювання і пропускної спроможності турбін. Напори залежать від положення рівнів верхнього і нижнього б'єфів, а в дериваційних установках – і від втрат напору в тракці, що підводить воду. Рівень верхнього б'єфа визначається наповненням водосховища і характером залежності $V = f(Z)$, а нижнього б'єфа – витратою і характером залежності $Q = f(Z)$, а також підпором від льодових утворень, від нижче лежачої установки або від природної водойми – озера, моря.

Водноенергетичні розрахунки виконуються для визначення основних водноенергетичних показників ГЕС (потужності і кількості енергії, що

виробляється) залежно від відмітки підпору, глибини спрацювання водосховища і т.п., а також для встановлення докладних характеристик роботи ГЕС (рівні верхнього б'єфа, напори, витрати і потужності ГЕС) при прийнятих основних параметрах водосховища і ГЕС.

Внаслідок коливань природного стоку річки і змінних вимог енергетичної системи, до складу якої входить ГЕС, потужність не зберігає постійної величини. Отже виникає необхідність визначення для потужності ряду значень. Якщо є регулююче стік водосховище, потужність ГЕС також залежить і від режиму регулювання. У зв'язку з цим для такої ГЕС ставиться додаткова задача – відшукати режим регулювання, який давав би найбільший енергетичний ефект.

Паралельно з водноенергетичними розрахунками виконуються енергетичні і техніко-економічні розрахунки. У задачу цих розрахунків входить встановлення ролі проекрованої ГЕС в енергетичній системі, розробка режиму її роботи і, нарешті, обґрунтування її основних параметрів – відмітки підпору, глибини спрацювання водосховища і встановленої потужності ГЕС.

5.2 Водноенергетичні характеристики ГЕС

Основними елементами при розрахунках потужностей ГЕС є витрати і напори. Після того, як одержані значення витрат і напорів, визначення потужності, що розвивається ГЕС зводиться до простих обчислень за формулою (5.4).

Ряд значень потужностей ГЕС, обчислених за деякий період, дозволяє визначити кількість енергії, що виробляється нею.

Розглянемо порядок розрахунку водноенергетичних характеристик по календарних гідрологічних рядах для ГЕС, що не мають водосховища сезонного або багаторічного регулювання, і для ГЕС, що мають в своєму розпорядженні водосховище сезонного або багаторічного регулювання.

ГЕС, що працюють без водосховища сезонного або багаторічного регулювання. Якщо верхнім б'єфом ГЕС є водосховище, яке не забезпечує сезонного або багаторічного регулювання, режим потужностей такої ГЕС визначатиметься в основному режимом природних витрат, що одержуються по матеріалах спостережень і гідрологічних розрахунків. В цьому випадку рівень верхнього б'єфа приймається постійним на відмітці НПГ, а нижнього б'єфа – на відмітках, що відповідають витратам за кривою $Q = f(Z)$, зокрема зимою – з врахуванням зимового коефіцієнта $K_{зим}$.

Стосовно цих умов водноенергетичні розрахунки виконуються за формою табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Хід водноенергетичних розрахунків

НПГ 235 м

№	Дата (інтервал)	Витрати, м ³ /с				Відмітка горизонту н.б., м	Напір, м	Потужності 8,5QH, тис. кВт	
		природні	втрати	можливі до використання	ГЕС			по водотоку	обмежуваним N _y по
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	IV	908	5	903	903	196,80	38,20	293	
2	V	1190	20	1170	1000	196,25	38,75	385	330
3	VI	854	20	834	834	195,68	39,32	278	
4	VII	605	20	585	585	195,22	39,78	198	
...

За різницею між природними витратами (граф 3) і втратами (граф 4) визначаються витрати води, можливі до використання на турбінах ГЕС (граф 5). Проте в багатоводні періоди внаслідок обмеженої пропускної спроможності турбін не вся витрата може бути використана гідроелектростанцією і частина її буде скинута вхолосту. Тому в графу 6 записується дійсна витрата води, що пропускається турбінами. Відмітки рівнів нижнього б'єфа визначаються за витратами графа 5, а якщо, окрім ГЕС, в нижній б'єф потрапляє додаткова витрата (включаючи витрату фільтрації), яка може вплинути на рівні, то необхідно враховувати і цю витрату. Напір (граф 8) визначається за різницею відміток рівнів верхнього б'єфа (оскільки рівень верхнього б'єфа постійний і дорівнює НПГ, то його відмітка виписується над таблицею) і нижнього б'єфа. У графу 9 виписуються потужності, обчислені за формулою (5.4) і за витратами графа 5. У графу 10 заносяться потужності з урахуванням обмежень по встановленій потужності ГЕС. Ці обмеження, так само як і обмеження, по використовуваних витратах (граф 6) мають значення лише для періодів з надлишковим стоком.

За даними граф 9 і 10 визначається вироблення енергії (за виразом (5.6)) за будь-який відрізок часу (зазвичай по роках) і в середньому за весь досліджуваний період. Перша із одержаних величин дає вироблення енергії по водотоку, тобто як би потенційні ресурси, а друга – враховує можливості використання води турбінами ГЕС. Остання характеризує найбільш можливе вироблення енергії ГЕС.

ГЕС, що працюють на зарегульованому водосховищем водотоці. Якщо верхнім б'єфом ГЕС є водосховище, яке здійснює сезонне або багаторічне регулювання стоку, режим потужностей такої ГЕС визначатиметься не лише величинами зарегульованих витрат, але і напорами, які залежать як від положення рівня нижнього б'єфа, так і від положення рівня верхнього б'єфа. Останній перебуває в прямій залежності від режиму регулювання стоку.

Припустимо, що режим регулювання визначається загальними умовами роботи ГЕС в енергетичній системі, і в розрахунковому періоді зарегульовані витрати задані календарно. Тоді сам розрахунок регулювання стоку виконується в послідовності, вказаній в розділі 2, пункті 2.4, табл. 2.1. Для одержання ж водноенергетичних характеристик ГЕС слід додатково обчислити можливі до використання витрати (за різницею витрат граф 4 і 12 табл. 2.1) і виконати розрахунок граф 7-10 табл. 5.1. У цьому розрахунку витратами ГЕС служитимуть дані графи 15 табл. 2.1, а напори будуть обчислюватися за різницею горизонтів верхнього б'єфа на середину інтервалу (графа 10 табл. 2.1) і нижнього б'єфа (графа 7 табл. 5.1). Характеристики ГЕС по виробленню енергії визначаються аналогічно попередньому.

У практиці енергетичного використання водних ресурсів мають місце приклади, коли регулююче стік водосховище не є верхнім б'єфом ГЕС, оскільки воно розташовано вище за течією на цьому ж водотоці або на його притоці. Оскільки в цьому випадку коливання рівнів водосховища не впливатимуть на напори ГЕС, розрахунок водноенергетичних характеристик можна вести за табл. 2.1. При цьому в графу 3 замість природних необхідно внести витрати води, зарегульовані верхнім водосховищем.

Результати розрахунків водноенергетичних характеристик ГЕС ілюструються хронологічними графіками і кривими тривалості. При водноенергетичних розрахунках додатково будуються графіки рівнів водосховища (замість графіка наповнень водосховища), напорів і потужностей ГЕС. При цьому для зарегульованих витрат і потужностей наводяться графіки як без обмеження, так і з обмеженням по встановленій потужності.

Даючи дуже наочну картину послідовності зміни окремих елементів режиму роботи ГЕС, хронологічні графіки разом з тим не описують повністю цей режим. Для повноти уявлення про режим роботи ГЕС необхідно підрахувати і побудувати криві тривалості. Останні характеризують середню за період тривалої експлуатації ГЕС тривалість (у відсотках або в днях для середнього року) підтримки різних величин того чи іншого елемента режиму роботи ГЕС. Криві тривалості будуються за рік в цілому або за окремі його частини (сезон, місяць).

5.3 Основні показники ГЕС

Встановлена потужність

Встановленою, називається потужність, яку максимально може розвинути електростанція. Вона визначається номінальною потужністю встановлених на ній агрегатів – турбін і генераторів.

Величина встановленої потужності залежить від потужності водотоку і тій ролі, яку виконуватиме електростанція, – чи буде вона працювати ізольовано від інших електростанцій або увійде до енергетичної системи, чи буде вести добове регулювання або така можливість відсутня, чи буде на ній розміщений резерв потужності системи і т.д.

ГЕС, що працюють ізольовано. ГЕС працюючі ізольовано покривають графік електричного навантаження, не пов'язаний із енергосистемою. Ступінь гарантії енерговіддачі для таких ГЕС зазвичай приймається 75-85 %. Цей ступінь призначається відповідно до значення електроспоживачів для господарства району впливу ГЕС.

Нехай будуть задані крива тривалості середніх добових (або середніх місячних) потужностей по водотоку і ступінь гарантії енерговіддачі ГЕС, наприклад, 80 %.

Величина необхідної встановленої потужності і розміри графіка навантаження, який покривається, визначаються в залежності від того, чи зможе ГЕС або не зможе вести добове регулювання.

1) ГЕС не веде добового регулювання. За кривою тривалістю для заданої забезпеченості $p=80\%$ визначаємо гарантовану потужність N_p . Внаслідок неможливості вести добове регулювання ГЕС покриє лише такий графік навантаження, максимальна ордината якого N_{\max} дорівнює N_p . У такому випадку достатня встановлена потужність

$$N_e = N_{\max} = N_p. \quad (5.8)$$

У години провалу добового навантаження матимуть місце холості скиди. Оскільки величиною N_p характеризується потужність в маловодну частину року, скиди також матимуть місце і в іншу пору року, коли потужності водотоку перевищують N_p .

2) ГЕС веде добове регулювання. За наявності добового регулювання в періоди роботи ГЕС на гарантованій потужності скиди виключаються, тому що в години провалу навантаження вода накопичується у водосховищі для наступного її використання в години підвищеного навантаження. В цьому випадку ГЕС зможе покрити більший добовий графік навантаження і встановлена потужність визначиться із

співвідношення

$$N_{\text{в}} = N_{\text{макс}} > N_p. \quad (5.9)$$

Холості скиди з'являтимуться лише в періоди надлишкових середніх добових потужностей за відношенням до N_p .

ГЕС, що працюють в енергосистемі. Для ГЕС, що працюють в енергетичній системі, є більші можливості реалізації потужностей водотоку, оскільки навантаження системи є зазвичай більшим в порівнянні з енерговіддачею окремо взятої електростанції. Тому з метою найбільшого використання енергії водотоку ГЕС реалізує в графіці навантаження не лише вироблення енергії, що визначається гарантованою потужністю N_p , але і вироблення енергії по вищій потужності, ніж N_p , в багатоводні періоди включно до встановленої потужності $N_{\text{в}}$, яка в цих випадках зазвичай значно більша ніж N_p .

Забезпеченість гарантованої енерговіддачі для ГЕС, працюючих в енергосистемі є, як правило, вищою, ніж для ГЕС, що працюють ізольовано, і залежить від ролі ГЕС в енергосистемі. Для ГЕС з великою вагою в енергосистемі за навантаженням і електроенергією забезпеченість приймається рівною 95 %, інколи навіть і вище.

Встановлена потужність таких ГЕС призначається, виходячи з можливостей добового регулювання і необхідності максимального використання енергії водотоку. В цьому випадку також має бути задана крива тривалості потужностей по водотоку і графік добового електричного навантаження енергетичної системи.

Розрахунок встановленої потужності ГЕС виконується за допомогою так званої **аналізуючої кривої** добового графіка навантаження енергосистеми. Ця крива являє собою інтегральний вираз площі графіка навантаження. Аналізуюча крива будується або згори вниз, приймаючи за нуль площі максимальну ординату графіка навантаження $P_{\text{макс}}$ або від низу догори, приймаючи за нуль площі $P = 0$.

1) ГЕС не веде добового регулювання. Якщо ГЕС не веде добового регулювання, то з метою повної реалізації вироблення енергії за гарантованою потужністю N_p вона повинна працювати в базисі графіка навантаження. Тоді її участь в покритті добового графіка в умовах розрахункової забезпеченості виразиться потужністю $N_{\text{уч}} = N_p$. Отже встановлена потужність решти електростанцій системи, які умовно можна назвати тепловими електростанціями, складатиме

$$N_{\text{ТЕС}} = N_{\text{макс}} - N_{\text{уч}}. \quad (5.10)$$

Якщо призначити встановлену потужність ГЕС $N_g = N_{уч}$, буде недовикористана енергія водотоку в багатоводні періоди, коли $N > N_p$, тоді як в графіці навантаження (також в базисній частині) таку потужність можливо реалізувати. Для підвищення використання енергії водотоку встановлену потужність збільшують до економічно виправданої межі N_g . Проте це збільшення встановленої потужності, що призводить в цілому до підвищення використання енергії водотоку, не підвищує участі ГЕС в покритті графіка навантаження в маловодних умовах і, отже, не витісняє встановленої потужності теплових електростанцій енергосистеми (5.10). Тому вказане збільшення встановленої потужності за відношенням до N_p називається **дублюючою потужністю**

$$N_d = N_g - N_p. \quad (5.11)$$

Дублювання потужності має бути економічно виправдано додатковим виробленням енергії, що реалізовується в графіці навантаження енергосистеми за багатоводні періоди.

2) ГЕС веде добове регулювання. Гідроелектростанція, що має можливість вести добове регулювання, з метою більшого витіснення потужності теплових електростанцій відводиться, як правило, пікова частина графіка навантаження енергосистеми. Добове регулювання може бути **необмеженим і обмеженим**.

Необмеженим називається таке регулювання, при якому допускається робота ГЕС з потужностями в діапазоні від N_g до повної зупинки її в години провалу добового навантаження, і у зв'язку з цим припинення стоку в нижній б'єф.

Обмеження добового регулювання можуть виникнути в результаті недостатніх розмірів водосховища або внаслідок вимог інших галузей народного господарства, коли не допускається скид великих витрат води або припинення стоку в нижній б'єф за умовами забору води на водопостачання, зрошування та інші потреби, або підтримка суднохідних глибин в навігаційний час і відстою судів в затоках і акваторіях судноремонтних заводів взимку. Ці обмеження втрачають практичний сенс, тобто знімаються з даної ГЕС, якщо її нижній б'єф перебуває в підпорі від установки, що пролягає нижче, або її нижнім б'єфом є природна водойма (озеро, морська затока і т.д.) і рівні нижнього б'єфа практично не залежать (або мало залежать) від витрат.

Для здійснення необмеженого добового регулювання необхідна ємність водосховища не більше ніж

$$V_{\max} \leq 0,25Q_B t_{\text{доб}}. \quad (5.12)$$

де V_{\max} – максимальний об'єм, який може знадобитися для добового регулювання при роботі ГЕС повною потужністю протягом 8 годин на добу і її повної зупинки на 16 годин, км³;

Q_B – витрата максимальної пропускної здатності турбін ГЕС, м³/с;

$t_{\text{доб}} = 86400$ – кількість секунд в добі.

Якщо розміри наявної ємності водосховища $V \geq V_{\max}$, і інших обмежень немає, ГЕС може вести необмежене добове регулювання.

ГЕС з необмеженим добовим регулюванням при роботі її на гарантованій середній добовій потужності N_p відводиться верхня частина графіка навантаження. У багатоводні ж періоди, коли водотоком забезпечується середня добова потужність $N > N_p$, щоб уникнути холостих скидів води і втрати енергії ГЕС відводиться напівпікова, або базисна, частина графіка навантаження.

Тобто як і у попередньому випадку, встановлена потужність теплових електростанцій системи складе (5.10).

Якщо водотік добре зарегульований та із збільшенням встановленої потужності N_g в порівнянні з $N_{yч}$ використання енергії підвищується трохи, приймається $N_g = N_{yч}$. При недостатній зарегульованості водотоку можливо помітне підвищення використання енергії із збільшенням N_g . Тоді N_g збільшують до економічно виправданої межі. При цьому додаткового витіснення встановленої потужності теплових електростанцій системи не станеться і також матиме місце дублювання потужності (5.11).

У конкретних умовах роботи ГЕС з тією або іншою середньою добовою потужністю обмеження по ємності водосховища встановлюються порівнянням добового вироблення енергії ГЕС E із запасами енергії водосховища (так званим «енергетичним еквівалентом ємності»), який визначається за виразом

$$E_B = \frac{KVH}{3600}, \text{ кВт-г}, \quad (5.13)$$

де K – коефіцієнт у формулі потужності;

V – ємність водосховища, м³;

H – середній напір, м.

Коли $E_B \geq E$ – обмежень немає.

За наявності обмежень по ємності водосховища участь ГЕС в покритті пікової частини графіка навантаження обумовиться величиною

E_B . Потужність участі в покритті піка графіка $N_{уч}^B$ відповідно енергії водосховища E_B визначиться так само, як у випадку, якщо б ГЕС не мала обмежень по добовому регулюванню.

Таким чином, кількість енергії E_B запасється у водосховищі і витрачається на верхівці графіка для одержання додаткової потужності $N_{уч}^B$. Решту добового вироблення енергії $\Delta E = E - E_B$ гідроелектростанція повинна виробити, використовуючи середню добову витрату води і розвиваючи потужність, що дорівнює N_p . Для цієї енергії має бути виділена така ділянка графіка навантаження (одержується підбором по аналізуючій кривій), в якому при потужності N_p виробіток якраз відповідав би величині ΔE . Цій умові задовольняє напівпікова частина графіка навантаження, в межах смуги якої з висотою N_p є пониження навантаження за площею, що дорівнює E_B . Вказане пониження навантаження і відповідає тій частині добового вироблення енергії ГЕС, яка не може бути реалізована по графіку навантаження і запасється у водосховищі для покриття піку графіка.

В разі обмеження по ємності водосховища повна потужність участі ГЕС в покритті графіка навантаження складатиме

$$N_{уч} = N_{уч}^B + N_p. \quad (5.14)$$

Як і раніше, встановлена потужність ГЕС приймається $N_g = N_{уч}$ або, якщо це виправдовується додатковим виробленням енергії, $N_g > N_{уч}$, причому, згідно виразу (5.11), матиме місце дублювання потужності, що дорівнює $N_g - N_{уч} = N_\partial$.

Якщо обмеження в добовому регулюванні потужності ГЕС спричиняються вимогами інших галузей господарства, якими задається мінімальна (базисна) в межах доби витрата, необхідна для підтримки будь-якого найнижчого рівня води в нижньому б'єфі, за цією витратою визначиться мінімальна потужність N_δ , а за нею $E_\delta = 24N_\delta$, яка розташовується в базисній частині графіка навантаження. Решті частині добового вироблення енергії $\Delta E' = E - E_\delta$ відводиться верхівка графіка і визначається $N'_{уч}$. Повна потужність участі в покритті графіка навантаження складе $N_{уч} = N'_{уч} + N_\delta$.

Встановлена потужність ГЕС і теплових електростанцій енергосистеми і в цьому випадку обирається з врахуванням міркувань наведених вище.

Таким чином, стосовно енергетики добове регулювання має дуже важливе значення, оскільки воно забезпечує більшу участь ГЕС в покритті потужностей графіка навантаження і як наслідок – більше витіснення потужності теплових електростанцій енергосистеми.

Число годин використання встановленої потужності

Характеристикою використання потужності електростанції служить так зване число годин використання встановленої потужності τ . Воно одержується як часткове від ділення річного вироблення енергії на встановлену потужність

$$\tau = \frac{E}{N_B}, \text{ г.} \quad (5.15)$$

Електростанції, основна роль яких полягає в покритті пікової частини графіка навантаження, мають невелике (2000-2500) число годин використання встановленої потужності. Називаються вони тому «піковими». Електростанції, що в основному покривають базисну частину графіка навантаження мають велике (6000-8000) число годин використання встановленої потужності і називаються «базисними». Для більшості крупних електростанцій число годин використання встановленої потужності дорівнює 4000-5000, чим характеризується їхня участь в покритті як пікової, так і базисної частини графіків навантаження.

Числом годин використання можна також характеризувати і графік електричного навантаження всієї енергосистеми. Тоді це число відноситься до пікової потужності графіка і стане показником «щільності» графіка: при малому τ – піковим, при великому τ – щільним.

Необхідно відзначити, що на попередніх стадіях проектування і при виборі основних параметрів ГЕС встановлена потужність призначається виходячи з числа годин її використання, враховуючи при цьому умови роботи ГЕС в енергосистемі. Для остаточно прийнятого варіанту відмітки НПГ і горизонту спрацювання водосховища встановлена потужність уточнюється на основі аналізу покриття графіка навантаження, повноти використання енергії водотоку, врахування необхідних резервів і т.п.

Коефіцієнт використання стоку

Під коефіцієнтом використання стоку η розуміється відношення використовуваного на ГЕС стоку до стоку, який міг би бути використаний при необмеженій пропускній спроможності турбін, тобто якби були відсутні холості скиди. Практично для ГЕС η визначається як часткове від ділення річного вироблення енергії з врахуванням обмеження по встановленій потужності E до вироблення енергії по водотоку $E_{вод}$, що одержуються в результаті водноенергетичного розрахунку

$$\eta = \frac{E}{E_{вод}}. \quad (5.16)$$

Коефіцієнт використання стоку залежить від ступеня здійснюваного регулювання стоку α та величини встановленої потужності (N_g), збільшуючись з підвищенням α і N_g .

5.4 Характеристики турбін

Експлуатаційні характеристики турбін встановлюються шляхом лабораторних випробувань моделей, геометрично подібних до турбін, які виконані в малому масштабі – діаметр колеса від 0,2 до 0,5 м або дещо більший. Зазвичай експлуатаційна характеристика будується в координатах: потужність (вісь абсцис) і напір (вісь ординат) і пов'язує потужність-напір-коефіцієнт корисної дії (рис. 5.1 а). На характеристиці наноситься лінія максимальної потужності турбіни (показана похилою лінією зі штрихуванням), яку вона може розвинути при тому або іншому напорі і повністю відчиненому напрямному апараті. Потужності, що відповідають повному відчиненню напрямного апарата турбіни, називаються **наявними**.

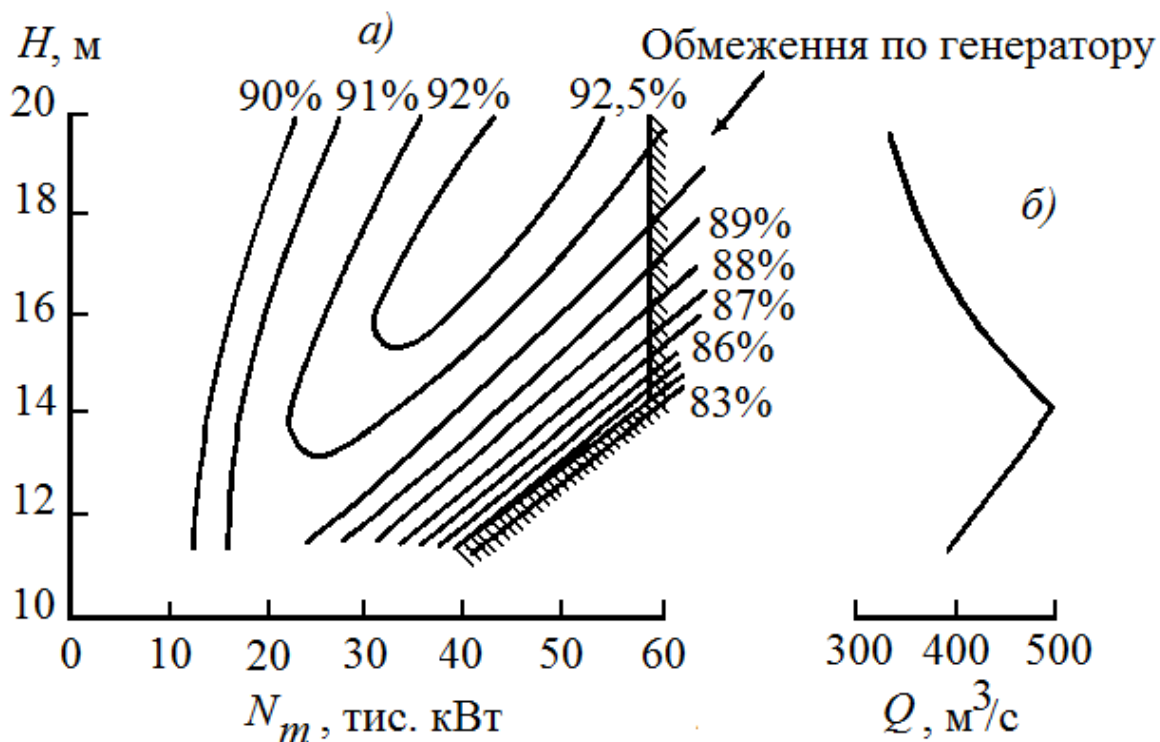


Рис. 5.1 – Універсальна характеристика турбіни (а)
і крива пропускнув спроможности турбіни (б)

У верхній частині характеристики потужність обмежується по генератору. Лінія обмеження потужності по генератору вертикальна (рис. 5.1 а).

Встановлена потужність ГЕС лімітується максимальною потужністю генераторів і дорівнює

$$N_g = N_z n, \text{ кВт.} \quad (5.17)$$

де N_z – потужність генератора, кВт;

n – кількість встановлених агрегатів.

Від потужності турбіни до потужності генератора і назад переходять через коефіцієнти корисної дії (к.к.д.) генератора η_z .

При розрахунках обмежень у використовуваних гідроелектричних станціях витрат користуються кривою пропускною спроможності турбіни (рис. 5.1 б), точки якої обчислюються виходячи з максимальних потужностей турбіни – генератора

$$Q_m = \frac{N_m}{9,81 H \eta_m}, \quad (5.18)$$

Сумарна витрата через ГЕС дорівнює

$$Q_{ГЕС} = Q_m n. \quad (5.19)$$

Як видно на рис. 5.1 а, лінії рівних к.к.д. замкнуті і, отже, для роботи турбіни є оптимальна зона, яка характеризується вищим к.к.д. Працюючи в цій зоні, турбіна віддає на одиницю використовуваної витрати найбільш високу потужність. При збільшенні або зменшенні навантаження відносно оптимуму турбіна працює з меншим ефектом. Тому в періоди, коли ГЕС не має повного завантаження, намагаються розподілити навантаження між агрегатами так, щоб вони працювали при вищих к.к.д.

В залежності від типу турбіни лінія наявної потужності, йде під різним кутом нахилу до осі абсцис. При малому куту нахилу розташована потужність із зменшенням напору різко знижується.

Оскільки напори в основному залежать від глибини спрацювання водосховища, збільшення спрацювання призводить до зниження напорів, що несприятливо позначається на розташованій потужності. Разом з тим із збільшенням глибини спрацювання збільшується корисна ємність водосховища, а з нею і ступінь регулювання стоку (віддача α).

Отже, із збільшенням глибини спрацювання водосховища гарантована потужність підвищується, а наявна потужність падає. При

необхідності наприкінці спрацювання водосховища мати велику наявну потужність за умовами участі ГЕС в покритті піка графіка навантаження доводиться інколи обмежувати це спрацювання будь-якою меншою глибиною в порівнянні з глибиною при найбільшому N_p , свідомо йдучи на деяку втрату гарантованої потужності.

Окрім вказаних факторів, що впливають на вибір доцільних меж спрацювання водосховища, необхідно враховувати також і ту обставина, що із збільшенням глибини спрацювання зменшується середнє річне вироблення енергії, за виключенням перших метрів спрацювання, коли вироблення збільшується внаслідок підвищення α і η .

5.5 Зміни рівнів, що спричиняються добовим регулюванням

При добовому регулюванні, на відміну від інших видів регулювання, зміни витрат відбуваються дуже швидко, тому рух води у верхньому і нижньому б'єфах установки носить несталий характер.

Із збільшенням навантаження ГЕС, тобто із збільшенням споживаної турбінами витрати в порівнянні з середньою добовою величиною, відбувається вилучення води з верхнього б'єфа і злив її в нижній б'єф, внаслідок чого у верхньому б'єфі утворюється хвиля спрацювання (негативна хвиля), а в нижньому б'єфі – хвиля наповнення (позитивна хвиля). Хвиля спрацювання спричиняє пониження рівня верхнього б'єфа, що поширюється вгору проти течії, хвиля наповнення – підвищення рівня нижнього б'єфа, що поширюється вниз за течією. Результатом пониження рівня верхнього б'єфа і підвищення рівня нижнього б'єфа є зменшення напору ГЕС.

При зниженні навантаження ГЕС спостерігається зворотна картина – у верхньому б'єфі утворюється хвиля підвищення рівня, що поширюється вгору проти течії, а в нижньому б'єфі – хвиля пониження рівня, що поширюється вниз за течією. Результатом підвищення рівня верхнього б'єфа і пониження рівня нижнього б'єфа є збільшення напору ГЕС.

Швидкість поширення хвилі несталоного режиму визначається за виразом

$$v = \sqrt{gh} \pm v_0, \quad (5.20)$$

де h – глибина потоку, м;

$g=9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили тяжіння;

v_0 – швидкість потоку при сталому режимі, м/с.

Знак плюс відповідає умовам поширення хвилі в нижньому б'єфі (за течією), знак мінус – у верхньому б'єфі (проти течії).

Додатковий обсяг води, що витік з верхнього б'єфа за деякий проміжок часу Δt і, що спричинив в ньому пониження рівня, вливаючись в нижній б'єф, розташовується в ньому в межах ділянки поширення позитивної хвилі. При цьому внаслідок значної ширини підпертого верхнього б'єфа вилучення з нього навіть порівняно великого обсягу води зазвичай не спричиняє будь-якого істотного пониження рівня. У нижньому ж б'єфі, навпаки, внаслідок меншої ширини природного русла злив додаткового обсягу води призводить до більш-менш різкого підвищення рівня.

Аналогічним чином затримання деякого обсягу води у верхньому б'єфі також не спричиняє помітного підвищення його рівня, тоді як в нижньому б'єфі спостерігаються незрівнянно великі пониження рівня.

Найбільш значні зміни рівнів в нижньому б'єфі мають місце в створі ГЕС. Нижче за течією ці зміни поступово згасають і на деякому відділенні від ГЕС стають мало помітними. Відстань, на яку поширюється вплив несталого режиму при добовому регулюванні, залежить від характеру графіка витрат і гідравлічних особливостей русла: ухилу, ширини, глибини, форми поперечних перерізів.

При гострих формах добового графіка навантаження – різких, але нетривалих піках та провалах коливання витрат і рівнів згасають в межах відносно коротких ділянок річки. Нерізкі, але тривалі зміни графіка навантаження впливають на рівні і витрати в межах значної довжини річки.

Зниження напору при підвищенні рівня нижнього б'єфа (і пониженні рівня верхнього б'єфа), співпадаючого за часом з найбільш високим навантаженням, може зменшити наявну потужність, і тим самим обмежити участь ГЕС в покритті піка добового графіка навантаження. Із зміною витрат і рівнів в нижньому б'єфі ГЕС при добовому регулюванні змінюються і швидкості течії, збільшуючись в години піка і знижуючись в години провалу навантаження. Велика амплітуда коливання рівнів за добу і наявність значних швидкостей течії може несприятливо позначитися на умовах судноплавства, утрудняючи відстій судів поблизу ГЕС, навантажувально-розвантажувальних робіт і плавання судів, при підході до споруд. Зменшення ж витрат і пов'язане з цим пониження рівня нижнього б'єфа в години провалу навантаження в навігаційний час може викликати зниження гарантованої глибини суднового ходу в зоні впливу несталого режиму або порушити нормальну роботу споруд, які відводять води. У зимовий час аналогічне зниження рівня може несприятливо відбитися на умовах відстою судів в затоках і ремонтних заводах, а також утруднити роботу водозабірних та інших споруд.

Питання для самоперевірки

1. Які фізичні характеристики роботи ГЕС Ви знаєте?
2. Як розраховується потужність ГЕС? У яких одиницях вона вимірюється?
3. Які водноенергетичні характеристики ГЕС Ви можете назвати? Поясніть хід їхніх розрахунків.
4. Яка потужність називається встановленою? Від чого залежать розміри встановленої потужності? Які ще характеристики роботи ГЕС Ви можете назвати?
5. Які характеристики турбін Ви знаєте?
6. Поясніть яким чином і за яких умов відбувається зміна рівнів при добовому регулюванні.

6 РЕГУЛЮВАННЯ ПАВОДКОВОГО СТОКУ

6.1 Задачі регулювання паводкового стоку

Регулювання паводкового стоку виконується з метою зменшення максимальних витрат води, що пропускаються в нижній б'єф споруд. Цим досягається зменшення розмірів водопропускних пристроїв і запобігаються водопілля на ділянках річках, розташованих нижче регулюючих водосховищ. Вказана задача відрізняється від тих, що розглядалися раніше, метою яких було підвищення низького стоку. Зрозуміло, що і тоді паводковий стік затримувався водосховищами. Проте це затримання переслідувало мету створення необхідних запасів води для подальшого їхнього використання, а зменшення максимальних витрат, що пропускаються в нижній б'єф, як самостійна задача не ставилася.

На водотоках з водопіллями від сніготанення, час настання і зразкова величина якого піддаються деяким передбаченням, регулювання високого стоку здійснюється ємністю водосховища, призначеною для щорічного обов'язкового спрацювання і наповнення. Такою ємністю, як відомо, при сезонному регулюванні є вся корисна призма водосховища, а при багаторічному регулюванні – лише сезонна складова.

На водотоках, де паводки формуються під впливом дощів і злив (наприклад, на річках Далекого Сходу), час настання і величина яких заздалегідь не може бути передбачена, для регулювання паводків повинна створюватися спеціальна (резервна) ємність водосховища. Спеціальна ємність створюється понад ємності, призначеної для регулювання з метою підвищення стоку маловодних періодів.

Крім того, при пропуску дуже великих водопіль і паводків зазвичай

допускається деяке підвищення рівня водосховища понад відмітки НПГ, тобто форсування рівня. У таких випадках в регулюванні паводкового стоку бере участь і призма форсування.

6.2 Розрахункові гідрографи

Розрахункові умови для пропуску паводків через гідротехнічні споруди регламентуються відповідними нормативами.

Згідно діючих нормативів, розміри водопропускних отворів повинні розраховуватися на пропуск нормального паводка (нормальні умови) при горизонті верхнього б'єфа на відмітці нормального підпірного горизонту (НПГ) і перевірятися на пропуск катастрофічного паводка (надзвичайні умови) при відмітці катастрофічного підпірного горизонту (КПГ). Відмітка КПГ перевищує відмітку НПГ на висоту допустимого за місцевими умовами підйому (форсування) рівня верхнього б'єфа, який матиме місце нетривало і у виключно окремих випадках при проходженні по річці катастрофічних паводків.

Першим розрахунком визначаються основні розміри водопропускних отворів в умовах роботи споруд з нормальними запасами піднесення гребня греблі над горизонтом води, міцності і стійкості споруд. Другим розрахунком перевіряється робота споруд при виключно високому паводку, при відповідно понижених запасах піднесення гребня греблі над горизонтом води, міцності і стійкості споруд.

В залежності від класу капітальності, до якого відноситься проектувана споруда, величини витрат, що підлягають пропуску через водопропускні отвори, повинні відповідати такій імовірності щорічного перевищення (табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Класи капітальності споруд

Умови експлуатації	Розрахункова імовірність перевищення максимальних витрат води у відсотках				
	Клас капітальності споруд				
	I	II	III	IV	V
1	2	3	4	5	6
Нормальні	-	-	3	5	10
Надзвичайні	0,01	0,1	0,5	1	-

Для споруд I і II класів розрахункова імовірність перевищення максимальних витрат в нормальних умовах не вказана. Ці споруди зазвичай проектуються на пропуск катастрофічної витрати при заданій

відмітці КПП, а фактична імовірність перевищення нормальної витрати визначається по пропускній спроможності отворів при горизонті верхнього б'єфа на відмітці НПП.

Висота допустимого форсування рівня на різних гідровузлах буває дуже різною і встановлюється в проекті на підставі техніко-економічного зіставлення низки варіантів пропускної спроможності гідровузла (довжини водопропускного фронту або числа отворів), а отже і відмітки гребня підпорних споруд. У кожному з цих варіантів висота форсування рівня визначається розрахунком трансформації катастрофічного паводка.

Вказана в табл. 6.1 імовірність щорічного перевищення максимальних витрат води приймається як в разі відсутності регулювання паводків, так і при здійсненні регулювання. При цьому в останньому випадку імовірність перевищення зарегульованих максимальних витрат вважається однаковою з імовірністю перевищення початкових для розрахунку паводків. Основними елементами розрахункових паводків є: об'єм, величина максимуму і форма гідрографа.

Об'єм паводка і величина максимуму заданої імовірності перевищення визначаються за кривими забезпеченості, параметри яких – середні величини і коефіцієнти мінливості – визначаються за результатами статистичної обробки даних спостережень, а при їхній відсутності – непрямыми методами. Коефіцієнти асиметрії встановлюються в нормативному порядку, відповідно до режиму водотоку. При цьому об'єми зазвичай беруться за стандартний відрізок часу тієї тривалості, яка відповідає найбільш розтягнутим паводковим хвилям. В межах цього відрізка часу в кожному році гідрологічного ряду і відбираються найбільші об'єми стоку. При проходженні ряду хвиль виділений стандартний відрізок часу повинен охоплювати весь паводковий період. Тоді об'єми стоку можна брати у межах календарних відрізків часу, що відповідають початку ранньої і кінцю пізньої хвилі паводків.

Гідрографам розрахункових паводків зазвичай надається форма, типова для найбільших спостережних паводків розглядуваного водотоку. Ординати розрахункових гідрографів визначаються перерахунком ординат гідрографів спостережних паводків, взятих за моделі. При недостачі або відсутності даних спостережень гідрографи розрахункових паводків будуються за аналогією з добре вивченими створами або іншими водотоками, або за теоретичними схемами – трикутника, трапеції, у вигляді біноміальної кривої та ін.

Для перерахунку ординат гідрографів-моделей в ординати розрахункових гідрографів користуються коефіцієнтами:

$$K_1 = \frac{Q_p}{Q} - \text{коли водосховище має невелику ємність і можлива його}$$

участь в «зрізанні» паводка обмежується гребенем хвилі, що безпосередньо прилягає до її максимуму. В цьому випадку вирішального значення набуває величина максимальної витрати і гострота піка гідрографа;

$$K_2 = \frac{W_p}{W} \text{ – коли водосховище має велику ємність і його участь в}$$

регулюванні паводків значна. В цьому випадку вирішального значення набуває не стільки висота піка, скільки об'єм паводка, оскільки регулюванням охоплюється значна частина періоду паводка.

У наведених виразах:

Q_p – максимум паводка заданої імовірності перевищення, м³/с;

W_p – об'єм паводка заданої імовірності перевищення, м³;

Q – максимум паводка-моделі, м³/с;

W – об'єм паводка-моделі, м³.

У практиці проектування розрахункові гідрографи інколи будуються таким чином, щоб і пік і об'єм паводка відповідали заданій імовірності перевищення. Таке допущення витікає з того, що на крупних водотоках дуже часто великому за об'ємом паводком відповідає високий пік. При відповідності величини піка і об'єму паводка, якщо це визивається необхідністю вирішуваної задачі, перерахунок ординат гідрографа-моделі виконується за коефіцієнтом K_2 , а пік розрахункового гідрографа приводиться до величини Q_p з домальовуванням гідрографа на гребні паводка при збереженні об'єму, що дорівнює W_p . При вдало обраній моделі домальовування гідрографа не буде значним, оскільки коефіцієнти K_2 і K_1 опиняться близькими між собою.

Дуже часто для розрахунків обирається не одна, а декілька моделей. У таких випадках висновки про вплив регулювання на зрізку паводка виконуються за тією моделлю, яка дає найбільш обережне рішення.

Гідрографи паводкової хвилі, що використовуються в розрахунках регулювання, повинні відноситися до так званого вхідного перерізу, тобто до перерізу, розташованого наприкінці виклинювання підпору. Необхідність побудови гідрографів у вхідному перерізі, а не у вихідному, де розташовується гребля, спричиняється тим, що першим відбувається приплив у водосховищі, тоді як другим – приплив, спотворений на руслову акумуляцію в межах затопленої підпором ділянки річки. Через це користування гідрографом у вихідному перерізі призводить до перебільшення ефекту регулювання, оскільки двічі враховується розпластування паводкової хвилі – один раз у природних умовах просування її по руслу, інший – при роботі водосховища.

Якщо початкові гідрологічні дані не забезпечують побудови

гідрографів у вхідному перерізі, ці гідрографи будуються шляхом ретрансформації гідрографів у вихідному перерізі. Вказана ретрансформація гідрографів полягає у вирішенні рівняння нерозривності (балансу) на ділянці, обмеженій вихідним і вхідним перерізами

$$Q_{вх} = Q_{вих} \pm \frac{\Delta V}{\Delta t} - Q_{пр}, \quad (6.1)$$

де $Q_{вх}$ – витрата у вхідному перерізі, середня за розрахунковий інтервал часу Δt , м³/с;

$Q_{вих}$ – витрата у вихідному перерізі, м³/с;

$Q_{пр}$ – середня за той же інтервал часу витрата припливу з бічного водозбору, м³/с;

ΔV – об'єм руслової акумуляції, м³.

Знак плюс відповідає підйому, знак мінус – спаду паводка.

Для вирішення цього рівняння необхідно мати криві витрат у низці створів або водомірні спостереження в тих же створах, а також мати морфометричні характеристики русла і заплави на досліджуваній ділянці.

Схема спрощеного розрахунку ретрансформації полягає у наступному.

У відповідності до характеру русла і заплави річки, а також за наявності кривих витрат або водомірних спостережень досліджуваній відрізок поділяється на ділянки. Для цих ділянок підраховуються і будуються об'ємні характеристики русла і заплави в залежності від середніх відміток на ділянках, тобто $V = f(Z_{сер})$.

Далі гідрограф паводкової хвилі у вихідному перерізі поділяється на інтервали, для меж яких з гідрографа знімаються витрати (рис. 6.1 а). Знаючи закономірність зміни витрат вздовж потоку, будуються графіки повздовжнього розподілу витрат (рис. 6.1 б). За витратами, користуючись кривими $Q = f(Z)$, одержують відмітки рівнів на межах ділянок, а за ними $Z_{сер}$. За даними кривими з кривих $V = f(Z_{сер})$ визначають руслові ємності, різниці яких для суміжних витрат дають руслову акумуляцію в межах того або іншого інтервалу часу Δt . Підсумовуванням руслової акумуляції за всіма ділянками ($\Delta V = \Delta V_I + \Delta V_{II} + \dots$), одержують величини ΔV , які входять у вираз (6.1).

Розрахований вказаним способом гідрограф у вхідному перерізі виходить ступінчастим. Шляхом згладжування гілок підйому і спаду з дотриманням рівновеликої площі йому надаються плавні контури. Цей гідрограф спільно з гідрографами припливу, що впадають в межах водосховища, і є початковими в розрахунках регулювання.

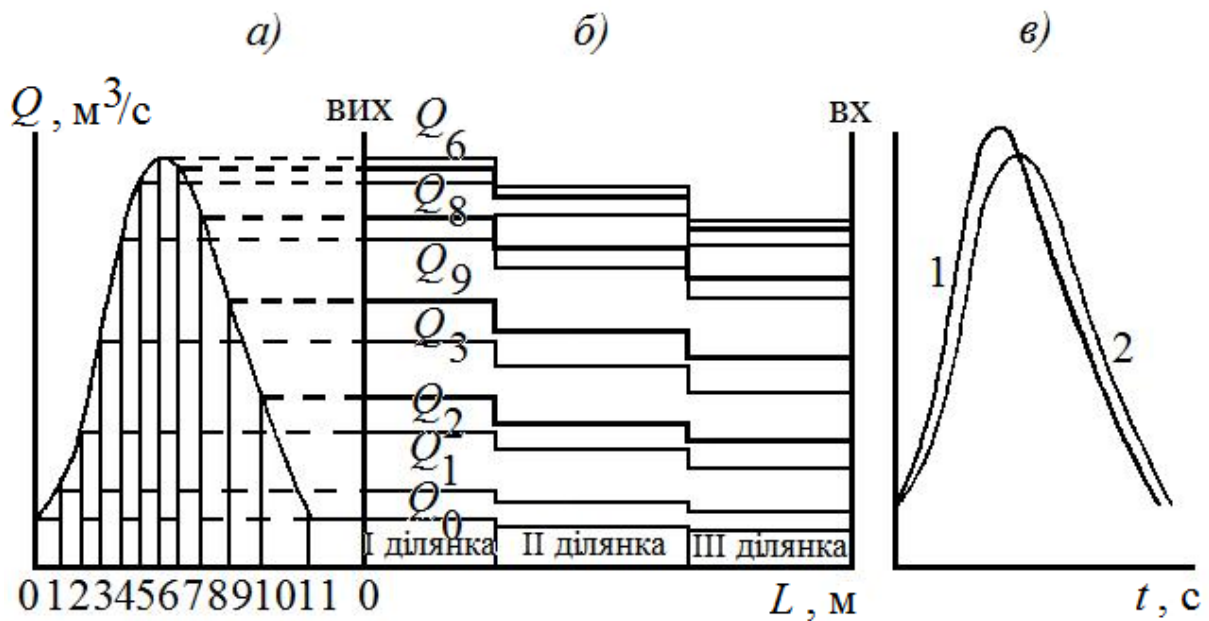


Рис. 6.1 – Гідрограф у вихідному перерізі (а), графік повздовжнього розподілу витрат (б) і гідрографи у вихідному 1 і вхідному 2 (сумарного припливу) перерізах (в)

Якщо розрахунок регулювання ведеться не за ділянками, а відразу за всім водосховищем, при ретрансформації гідрографа (6.1) можна не виключати витрати Q_{np} . Тоді гідрограф у вхідному перерізі характеризуватиме сумарний приплив у водосховище.

Остаточний вигляд гідрографа сумарного припливу у вхідному перерізі в зіставленні з початковим гідрографом у вихідному перерізі наведений на рис. 6.1 в. Пік витрат у вхідному перерізі вищий, а форма гідрографа гостріша у порівнянні з гідрографом у вихідному перерізі.

6.3 Загальна схема розрахунків регулювання паводкового стоку по статичній ємності водосховища

Топографічні характеристики водосховища у вигляді залежності $V = f(Z)$ будуються в припущенні горизонтальності його водного дзеркала, що відповідає гідростатичній рівновазі, яка спостерігається при нерухомості рідини, що наповнює і спрацьовує водойму. У зв'язку з цим ємності водосховища, взяті за даними залежностями, називають **статичними**.

Статичні ємності не завжди можуть правильно характеризувати об'єм води, що міститься у водосховищі, оскільки дзеркало у деяких випадках відхиляється від горизонтального положення. Це відхилення

визначається контурами кривої вільної поверхні, форма якої залежить від висоти підпору біля греблі, гідравлічних властивостей русла та від величини і розподілу витрати за довжиною потоку. При інших рівних умовах, чим менший підпор і більша витрата, тим сильніше крива вільної поверхні відхиляється від горизонтальної лінії. Тому для установок, підпір яких значно перевищує амплітуду коливань природних рівнів, використовуюваного водотоку, негоризонтальність водного дзеркала мала і неврахування її практично не позначається на правильності водогосподарських розрахунків. У таких випадках розрахунки регулювання паводків або розрахунки трансформації паводкового гідрографа виконуються **по статичних ємностях водосховища**. Для установок же з невеликим підпором природних рівнів негоризонтальність дзеркала є значною і неврахування її істотно спотворить результати водогосподарських розрахунків, отже, нехтувати нею не можна. У подібних випадках розрахунки регулювання паводків повинні ґрунтуватися на залежностях, що відбивають при заданому режимі надходження і витрачання води у верхньому б'єфі дійсні контури водної поверхні, тобто **по динамічних ємностях водосховища**.

Отвори для відводу води з водосховища

Відведення води з водосховища виконується через отвори, що призначаються для пропуску корисно використовуваних витрат, і через отвори, що скидають надлишкову воду вхолосту.

Для скиду води вхолосту, а також для скиду плаваючих тіл (льоду, сміття та ін.) влаштовуються спеціальні водоскидні отвори. Водоскидні отвори можуть бути розташовані в тілі греблі, в тілі інших споруд гідровузла, наприклад гідроелектростанції і в берегах річки. Застосовуються два типи водоскидів – з **поверхневими і заглибленими отворами**. У першому випадку вода скидається через гребінь або поріг в умовах потоку з вільною поверхнею; у другому відбувається виток води під напором, оскільки отвори розташовуються на глибині, інколи навіть на значній. Поверхневі отвори зазвичай називають **водозливами**, заглиблені – **водоспусками**.

Для зачинення отворів застосовуються затвори, за виключенням окремих видів водозливів з вільним витокком.

Окрім згаданих типів водоскидів, застосовується особливий їхній вид – сифонові водоскиди, що працюють автоматично і не вимагають будь-яких затворів.

Пропускню спроможність водозливу визначають за загальновідомою формулою гідравліки

$$Q = m \sigma_n b \sqrt{2g} H_0^{3/2} n, \quad (6.2)$$

де m – коефіцієнт витрати, що залежить в основному від форми профілю водозливу;

σ_n – коефіцієнт затоплення;

b – довжина водозливу (одного прольоту), м;

H_0 – напір на гребні водозливу з врахуванням швидкості підходу,

тобто $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$, м;

n – число прольотів.

Пропускна спроможність водоспуску визначають за формулою

$$Q = \mu \Omega \sqrt{2gH_0} n, \quad (6.3)$$

де $H_0 = H + \frac{v_0^2}{2g}$,

H – напір (різниця рівнів верхнього і нижнього б'єфів, якщо вихід отвору затоплений, або глибина води над центром вихідного перерізу водоспуску, якщо він не затоплений), м;

Ω – площа водопропускного отвору, м²;

μ – коефіцієнт витрати;

n – число отворів.

Докладні вказівки по розрахунку пропускної спроможності водоскидних отворів і значення коефіцієнтів, що входять у формули (6.2) і (6.3), можна знайти в спеціальній літературі з гідравліці споруд.

Розрахунки регулювання

Для виконання розрахунків регулювання паводків необхідно мати:

а) гідрографи у вхідному перерізі і гідрографи бічної припливності (або сумарні гідрографи, віднесені до вхідного перерізу) заданої імовірності перевищення;

б) криві пропускної спроможності отворів, що відводять з водосховища воду, корисно використовувану, і холості скиди;

в) криві площ дзеркала і об'ємів водосховища;

г) відмітку рівня передпаводкового спрацювання водосховища, відмітки НПГ і КПГ;

д) вказівки про порядок пропуску паводків.

Припустимо, що вказівками по пропуску паводків передбачається робота водоскидних отворів з повним їхнім відкриттям вже при відмітці передпаводкового рівня водосховища Z_0 . Тоді розрахунок необхідно розпочинати з моменту t_0 , коли на підйомі паводка витрата, що надходить до водосховища, дорівнює пропускній спроможності всіх отворів при тому ж рівні Z_0 .

У наступний час, оскільки наростання припливних витрат відбувається інтенсивніше при збільшенні пропускної здатності скидних отворів внаслідок підвищення рівня водосховища, відбувається акумуляція надлишкового стоку. Акумуляція триває до моменту t_n , в якому припливна витрата, вже на спаді паводка стане дорівнювати витраті, що скидається (рис. 6.2 б). У момент t_n рівень водосховища досягає свого найвищого положення, а скидна витрата – максимального значення.

Пропускна спроможність водоскидних отворів спочатку задається приблизно, виходячи з характеру розрахункового паводка і можливостей зрізки його водосховищем, при врахуванні корисно використовуваних витрат. Як правило, в розрахунок трансформації паводків вводиться декілька варіантів пропускної спроможності водоскидів, що зазвичай розрізняються між собою кількістю споруджуваних водозливних або водоспускових отворів. Остаточню приймається той варіант, який задовольняє заданим умовам пропуску паводка: нормальний паводок проходить без перевищення відмітки НПГ, а катастрофічний – при допустимому форсуванні рівня.

Нехай буде заданий гідрограф нормального паводка, пропускна здатність водоскидних отворів та криві площ дзеркала і об'ємів водосховища (рис. 6.2), а також передпаводковий рівень Z_0 і відмітка НПГ.

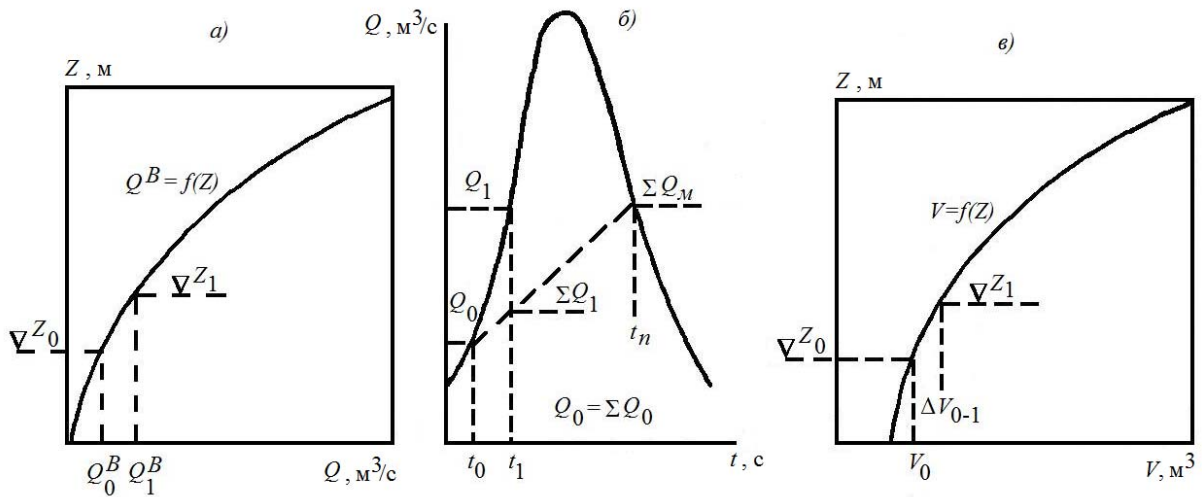


Рис. 6.2 – Схема розрахунку пропуску паводка

Умовні позначення: *a* – крива пропускної здатності водосховища;
б – гідрограф паводка;
в – крива об'ємів водосховища

Введемо такі позначення:

Q_0^B – пропускна спроможність водоскидних отворів при відмітці водосховища Z_0 , м³/с;

ΣQ_0 – сумарна витрата води, що відводиться з водосховища в початковий момент часу t_0 ($\Sigma Q_0 = Q_0^B + Q_0^K$), де Q_0^K – корисно використовувана витрата), м³/с;

Q_0 – витрата припливу в початковий момент часу t_0 . За умовами задачі $Q_0 = \Sigma Q_0$, м³/с.

Аналогічні величини у момент часу $t_1 = t_0 + \Delta t_{0-1}$ мають індекс 1.

За інтервал часу Δt_{0-1} баланс стоку виразиться різницею об'ємів води, що надходить і відводиться, тобто

$$\Delta W_{0-1} = \left(\frac{Q_0 - Q_1}{2} - \frac{\Sigma Q_0 + \Sigma Q_1}{2} \right) \Delta t_{0-1}. \quad (6.4)$$

На величину ΔW_{0-1} зміниться наповнення водосховища, яке у момент t_1 повинне дати рівень на відмітці Z_1 , що забезпечує скид витрати Q_1 .

Оскільки на початку розрахунку відмітка Z_1 не відома, отже, не відома і витрата Q_1^B , а звідси і сумарна витрата ΣQ_1 . Тому задачу доводиться вирішувати підбором.

Спочатку задається кінцева відмітка рівня $Z_1 = Z_0 + \Delta Z_{0-1}$. За кривою пропускної спроможності водоскидних отворів (рис. 6.2 а) при відмітці Z_1 визначається витрата Q_1^B або, що то ж саме, ΣQ_1 . Потім за рівнянням (6.4) розраховується об'єм ΔW_{0-1} . Далі перевіряється відповідність заданої зміни рівня водосховища ΔZ_{0-1} з можливим за допомогою балансу стоку шляхом звіряння призначеної зміни наповнення водосховища з об'ємом ΔW_{0-1} за рівнянням балансу (6.4)

$$\Delta V = \frac{1}{2} \Delta Z F_{0-1}, \quad (6.5)$$

де F_{0-1} – середня площа дзеркала в інтервалі часу Δt_{0-1} , яка визначається за кривою при середньому рівні водосховища

$$Z_{0-1} = Z_0 + \frac{1}{2} \Delta Z_{0-1}. \quad (6.6)$$

При невідповідності об'ємів за (6.4) і (6.5) розрахунок повторюється при іншій зміні рівня ΔZ_{0-1} , поки не буде досягнуте співвідношення $\Delta W_{0-1} \cong \Delta V_{0-1}$.

Закінчивши розрахунок за перший інтервал Δt_{0-1} , переходять до розрахунків за другий Δt_{1-2} , потім за третій Δt_{2-3} і т.д., поки не буде прорахований весь гідрограф до моменту t_n (рис. 6.2).

Якщо кінцевий результат задовольняє поставленим вимогам, тобто наприкінці паводка (t_n) найвищий рівень опиняється на відмітці НПП, перший етап розрахунків на цьому закінчується. Інакше розрахунок повторюється при зміненій пропускної спроможності водоскидних отворів: у менший бік, якщо рівень не досяг відмітки НПП, і у більший бік, якщо рівень перевищив її.

Другий етап розрахунків полягає в перевірці достатності одержаної пропускної спроможності водоскидних отворів пропуску катастрофічного паводка за умови неперевищення КПП. Ця перевірка ведеться за допомогою гідрографа відповідної імовірності перевищення і в тій же послідовності, яка прийнята при розрахунках нормального паводка.

Якщо форсування рівня укладається в допустимі межі, одержана за умовами пропуску нормального паводка пропускна спроможність водоскидних отворів остаточно приймається для даної споруди. Якщо ж форсування рівня в надзвичайних умовах виявилася більше допустимої розрахунок повторюється, починаючи цього разу з пропуску катастрофічного паводка (перший етап розрахунків). Подальшим розрахунком (другий етап) встановлюється імовірність перевищення паводка, що відповідає нормальним умовам експлуатації споруд, виходячи з досягнення в такий паводок рівня водосховища на відмітці НПП.

У такій же послідовності ведуться розрахунки і при проектуванні споруд I і II класів капітальності, оскільки нормативами в якості початкових для розрахунку задаються надзвичайні умови (табл. 6.1).

Розрахунок пропуску паводка ведеться за формою табл. 6.2.

Схема розрахунку показана на рис. 6.2.

Якщо вказівками пункту переліку необхідних початкових даних передбачається інший режим пропуску паводків, коли, наприклад, спочатку, відчиняється частина отворів, а після досягнення у водосховищі будь-якого наперед заданого рівня Z_i кількість працюючих отворів додатково збільшується, в розрахунках враховується відповідно цей порядок відчинення скидних отворів.

Режим пропуску паводка, що передбачає повне відчинення всіх отворів з настанням великих витрат, що розглядався в попередньому прикладі, забезпечує найбільшу зрізку гребня хвилі паводка, оскільки впродовж всього часу повністю використовується пропускна спроможність водоскиду. Проте такий порядок відчинення отворів можливо здійснити

Таблиця 6.2 – Розрахунок попуску паводка

День	Q , м ³ /с	$\frac{Q_0 + Q_1}{2}$, м ³ /с	Q^B , м ³ /с	Q^K , м ³ /с	ΣQ , м ³ /с	$\frac{\Sigma Q_0 + \Sigma Q_1}{2}$, м ³ /с	різниця за графами 3-7	ΔW , км ³	$V + \Delta W$, км ³	Z , м	$Z_0 + \frac{1}{2}\Delta Z$, м	F , м ²	ΔZ , м	ΔV , км ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	11900			1950	1950				34,42	548,20				
		12700	150			2025	10675	0,92			548,86	700	1,32	0,92
1	13500			1950	2100				35,34	549,52				
		13950	300			2175	11775	1,02			550,20	745	1,37	1,02
2	14400			1950	2250				36,36	550,89				
		13200	500			2350	10850	0,94			551,52	750	1,25	0,94
3	12000			1950	2450				37,30	552,14				
...

лише за наявності добре поставлених прогнозів, оскільки помилка в оцінці паводка у бік перебільшення призведе до недоповнення водосховища і, отже, до неповного задоволення інтересів водоспоживачів.

За цієї причини в правилах експлуатації водосховищ перевага віддається послідовному відчиненню водоскидних отворів в ході наростання паводка. Хоча такий порядок відчинення отворів і призводить до деякого збільшення пропускної здатності водоскидних споруд, але він забезпечує краще використання водосховища і більш надійну його роботу на гарантованому режимі.

6.4 Схеми спрощених розрахунків регулювання паводкового стоку

За Д.І. Кочериним

Вище розглядався один з можливих шляхів розрахунку трансформації паводка, заснований на підборі розмірів водоскидних отворів. Шлях цей досить довгий і застосовується при більш-менш точних розрахунках.

При наближених же розрахунках зазвичай застосовується спрощений прийом, запроваджений в практику Д.І. Кочериним (1927 р.). Він заснований на тому, що графіку скидних витрат надається прямолінійний контур від мінімуму на початку паводка до точки максимуму. Про величину похибки, пов'язаної з припущенням про прямолінійність закону зміни скидних витрат, можна судити по точності визначення ємності водосховища. Порівняння результатів при врахуванні дійсних контурів і графіка скидних витрат з прямолінійним показує, що похибка перебуває в межах 5-10 %. Це дозволяє вважати спосіб Кочерина цілком прийнятним на попередніх стадіях проектування.

Д.І. Кочериним розрахункові гідрографи виражаються за формою трикутників і трапецій. Обидві форми гідрографів – трикутна і трапецеїдальна – дозволяють значно спростити розрахунок трансформації паводка, зводячи його до простих підрахунків за формулами. Вказані формули дають можливість за відомими елементами гідрографа і ємності водосховища знайти максимальну скидну витрату або, навпаки, за заданою максимальною скидною витратою і відомими елементами гідрографа знайти величину необхідної ємності водосховища.

Трикутна форма гідрографа. Нехай буде заданий гідрограф трикутної форми (рис. 6.3 *a*). Елементами цього гідрографа є величина піка Q_M , об'єм паводка W і тривалість паводка T .

Визначимо ємність водосховища, необхідну для зарегулювання паводка до максимальної скидної витрати Q_M^B .

Припускаючи наростання витрат, що проходять через отвір за прямою, всередині трикутника припливу з верхівкою Q_M одержимо трикутник скидних витрат з верхівкою Q_M^B .

Різниця площ трикутників і дасть шукану ємність водосховища

$$V = \frac{Q_M T}{2} - \frac{Q_M^B T}{2} = \frac{Q_M T}{2} \left(1 - \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (6.7)$$

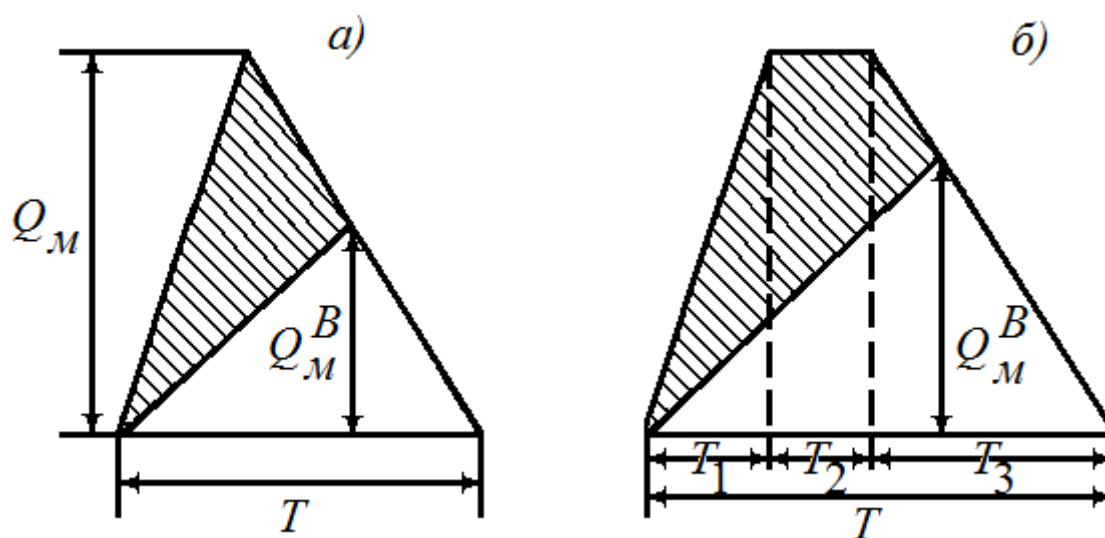


Рис. 6.3 – Схема розрахунку пропуску паводка за Д.І. Кочериним при трикутній (а) і трапецеїдальній (б) формах гідрографа

Оскільки $\frac{Q_M T}{2} = W$, то вираз (6.7) можна записати у такому вигляді

$$V = W \left(1 - \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (6.8)$$

Вирішуючи задачу відносно максимальної скидної витрати, будемо мати

$$Q_M^B = Q_M \left(1 - \frac{V}{W} \right). \quad (6.9)$$

Трапецеїдальна форма гідрографа. Елементами гідрографа трапецеїдальної форми також є величина максимальної витрати Q_M , об'єм

паводка W і тривалість паводка T . Загальний період паводка складається з періоду підйому T_1 , періоду T_2 , впродовж якого утримується максимальна витрата, і періоду спаду T_3 , тобто $T = T_1 + T_2 + T_3$.

Припускаючи і в цьому випадку наростання скидних витрат за прямою, всередині трапеції одержимо трикутник скидних витрат (рис. 6.3 б). Різницею площ трапеції і трикутника як і раніше визначиться ємність водосховища, якщо задана максимальна скидна витрата Q_M^B

$$\begin{aligned} V &= \left(\frac{Q_M T_1}{2} + Q_M T_2 + \frac{Q_M T_3}{2} \right) - \frac{Q_M^B T}{2} = \\ &= \left(\frac{Q_M T}{2} + \frac{Q_M T_2}{2} \right) - \frac{Q_M^B T}{2} = \frac{Q_M T}{2} \left(1 + \frac{T_2}{T} - \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \end{aligned} \quad (6.10)$$

Якщо задана ємність водосховища, максимальна скидна витрата визначиться з виразу (6.10), як

$$Q_M^B = Q_M \left[\left(1 + \frac{T_2}{T} \right) \left(1 - \frac{V}{W} \right) \right] = \frac{Q_M}{\eta} \left(1 - \frac{V}{W} \right). \quad (6.11)$$

Вирази (6.7) і (6.10) можна замінити одним

$$V = W \left(1 - \eta \frac{Q_M^B}{Q_M} \right). \quad (6.12)$$

$$\text{Тут } \eta = \frac{T}{T + T_2}.$$

Очевидно, що при трикутній формі припливного гідрографа $T_2 = 0$ і $\eta = 1$. Таким чином, формули (6.9) і (6.8) витікають безпосередньо з формул (6.11) і (6.12).

У розрахунках за схемою Д.І. Кочерина передбачається, що з водосховища вода відводиться тільки через водоскидні отвори. Якщо ж, як це буває зазвичай, з водосховища одночасно забирається і корисно використовується витрата Q^K , в розрахунках необхідно врахувати і цю витрату. Для цього достатньо шкалу витрат піднести над основою гідрографа на висоту, що дорівнює (у масштабі витрат) Q^K , відповідно перерахувати величини Q_M , W і T та виконати розрахунок, як вказано вище.

Спосіб Кочерина можна поширити і на випадки з криволінійними контурами гідрографів припливу. Проте такі гідрографи заздалегідь необхідно дещо схематизувати, надавши їм трикутну або трапецеїдальну форму, находячись при цьому у межах заданого об'єму паводка W .

За іншими авторами

Низкою авторів запропоновані формули, в основі яких лежить та ж схема розрахунку, використана Д.І. Кочериним.

Наприклад, Д.Л. Соколовський виходить зі схематизації гідрографів припливу і витратах за параболоми, що пропускаються через водоскидний отвір та одержує розрахункову формулу для визначення зменшення максимальної витрати за рахунок регулювання

$$r = \frac{Q_M^B}{Q_M} = k \left(1 - \frac{V}{W} \right), \quad (6.13)$$

$$\text{де } k = \frac{(1 + \gamma)f_1}{(1 + \gamma_1)f} \leq 1;$$

γ і γ_1 – величини відношення тривалості підйому і спаду гідрографів припливу та скидних витрат;

f і f_1 – коефіцієнти форми гідрографів припливу і скидних витрат.

При трикутній формі гідрографа припливу і наростанні скидних витрат за прямою коефіцієнт $k=1$ і, отже, з формули (6.13) витікає, як окремий випадок, формула (6.9).

На думку В.Г. Андреева, коефіцієнт k в першому наближенні може прийматися рівним 0,80.

Якщо скид витрат регулюватиметься затворами, наведені вище формули непридатні. Для цих більш складних випадків вони були перетворені В.І. Мокляком, І.А. Железняком, В.Н. Цингером та ін.

Для розрахунку трансформації паводкового стоку системою водосховищ на малих річках також є низка формул: Інституту гідрології і гідротехніки АН УРСР, А.В. Огієвського, В.Н. Цингера, Я.Ф. Плешкова та ін. Деякі з цих формул, наприклад Цингера і Плешкова, засновані на допущенні зіставлення природних максимумів з часткових водозборів зі скидними максимумами витрат з вище розташованих водосховищ, що суперечить реальним умовам і призводить до зменшення ефекту регулювання.

Формули І.А. Железняка розглядають частковий випадок, коли в басейні створюється одне водосховище.

Згаданими формулами не враховується вся складність процесів формування максимального стоку, обумовлених наявністю водосховищ. Ними також не враховується регулююча роль руслової ємності на ділянках

між водосховищами. Тому розрахунки за формулами можуть привести до великих похибок, що слід мати на увазі при користуванні ними. Шлях вирішення задач трансформації паводкового стоку, що забезпечує найбільш високу точність результатів, полягає в розрахунках за гідрографами припливу, які надходять в кожний б'єф, і гідравлічному аналізі трансформації хвилі паводка водосховищами.

6.5 Розрахунки регулювання паводкового стоку по динамічній ємності водосховища

Задача розрахунків регулювання паводкового стоку по динамічній ємності водосховища зводиться до сумісного вирішення двох рівнянь гідравліки – рівняння динамічної рівноваги і рівняння нерозривності.

Рівнянням динамічної рівноваги визначаються контури вільної поверхні в кожний момент часу.

У річковій гідравліці динамічну рівновагу прийнято виражати рівнянням

$$Q = K\sqrt{I}, \quad (6.14)$$

де $K = C\omega\sqrt{H}$ – модуль витрати води – пропускна здатність русла;

I – ухил водної поверхні;

H – середня глибина (для широких річкових русел вона дорівнює гідравлічному радіусу), м;

ω – площа живого перерізу, м²;

Q – витрата води, м³/с;

C – коефіцієнт, що визначається за допомогою однією з емпіричних формул Павловського, Маннінга та ін.

Пропускна здатність русла, по можливості, повинна визначатися за даними безпосередніх гідрометричних вимірювань.

Виразом (6.14) не враховуються інерційні члени динамічного рівняння, що характеризують сили, виникаючі в результаті зміни швидкості перебігу за довжиною потоку і часу. Однак ці члени в застосуванні до даної задачі дуже малі.

Рівнянням нерозривності характеризується зв'язок між об'ємами води, що надходять в межі даної ділянки річки або водосховища ΔW_D , що відводяться з неї ΔW_B і ΔV , що акумулюються в ній.

Математично цей зв'язок може бути виражений як

$$\Delta W_D - \Delta W_B = \Delta V. \quad (6.15)$$

При практичному вирішенні задачі регулювання паводкового стоку по динамічній ємності водосховища, так само як і при вирішенні інших задач несталоного режиму, відрізок водосховища (водотоку) розбивається на низку ділянок, а розрахунковий гідрограф – на низку елементарних відрізків часу. Розміри ділянок і тривалість розрахункових інтервалів часу приймаються такими, щоб була можлива лінійна інтерполяція.

На початку гідравлічного розрахунку вважаються заданими дві граничні умови: гідрограф у вхідному перерізі розрахункової імовірності перевищення і гідрограф витрат, що пропускаються в нижній б'єф. До початкових умов розрахунку також відноситься і початкова відмітка рівня водосховища біля греблі, а отже і крива вільної поверхні в початковий момент часу розрахунку.

Внаслідок того, що одна гранична умова задається в самому верхньому (вхідному), а інша в самому нижньому (вихідному) перерізах, розрахунок ведеться послідовно, переходячи від однієї ділянки до іншої. Вихідний переріз верхньої за течією ділянки є вхідним перерізом нижче розташованої ділянки.

Розрахунок здійснюється підбором, задаючись значеннями невідомих характеристик і перевіряючи відповідність їх гідравлічним рівнянням. Правильність заздалегідь заданих характеристик, що відносяться до вихідного перерізу (біля греблі), перевіряється після того, як буде прорахований повністю гідравлічний ланцюг.

При розрахунку гідравлічного ланцюга, що відноситься до певного моменту часу, рівняння динамічної рівноваги і нерозривності зазвичай вирішуються за допомогою графічних залежностей, побудованих для кожної ділянки.

Оскільки, згідно (6.14), витрата води в будь-який момент

$$Q = K_{сер} \sqrt{\frac{\Delta Z}{\Delta S}}, \quad (6.16)$$

перша з вказаних залежностей може бути зображена у вигляді номограми $Q = f(Z_{вх}, Z_{вих})$.

де $K_{сер}$ – середня пропускна спроможність ділянки, що визначається за заданими $Z_{вх}$, $Z_{вих}$ за формулою

$$K_{сер} = \frac{K_{вх} K_{вих}}{\sqrt{\frac{1}{2}(K_{вх}^2 + K_{вих}^2)}}, \quad (6.17)$$

де $K_{вх}$ і $K_{вих}$ – пропускна здатність у вхідному і вихідному перерізах;

$\Delta Z = Z_{вх} - Z_{вих}$ – різниця між рівнями у вхідному і вихідному перерізах;

ΔS – довжина ділянки;

$J_{сер} = \frac{\Delta Z}{\Delta S}$ – характеризує середній ухил водної поверхні на ділянці.

Приклад номограми показаний на рис. 6.4. Будується вона за даними розрахунків великого числа кривих вільної поверхні в умовах сталого режиму.

Друга графічна залежність виражається у вигляді $V = f(Z_{сер})$ і виражає функціональний зв'язок між об'ємами води V , що міститься в руслі, і середнім на ділянці рівнем $Z_{сер}$ (напівсума рівнів на початку і кінці ділянки). Вона будується за топографічними даними.

Ґрунтуючись на прийнятих позначеннях, рівняння динамічної рівноваги можна записати в наступному вигляді:

для початкового моменту

$$\frac{Q_{вх.поч} + Q_{вих.поч}}{2} = K_{поч} \frac{\sqrt{Z_{вх.поч} - Z_{вих.поч}}}{\sqrt{\Delta S}}, \quad (6.18)$$

і для кінцевого моменту

$$\frac{Q_{вх.кін} + Q_{вих.кін}}{2} = K_{кін} \frac{\sqrt{Z_{вх.кін} - Z_{вих.кін}}}{\sqrt{\Delta S}}, \quad (6.19)$$

де $K_{поч}$ і $K_{кін}$ характеризують середні на ділянці пропускні здатності, що визначаються за формулою (6.17).

Аналогічно цьому рівняння нерозривності, спочатку записане за формою виразу (6.15), може бути виражено у вигляді

$$\frac{Q_{вх.кін} + Q_{вих.кін} - (Q_{вих.поч} + Q_{вх.кін})}{2} \Delta t = V_{кін} - V_{поч}, \quad (6.20)$$

де Δt – розрахунковий інтервал часу.

Наведене показує, що впродовж кожної розрахункової ділянки і кожного інтервалу часу несталий режим характеризується 8 елементами: $Z_{вх.поч}$; $Z_{вих.поч}$; $Q_{вх.поч}$; $Q_{вих.поч}$; $Z_{вх.кін}$; $Z_{вих.кін}$; $Q_{вх.кін}$; $Q_{вих.кін}$.

Перші чотири елементи, що відносяться до початкового моменту часу, задані початковими умовами розрахунку (кінцеві елементи для

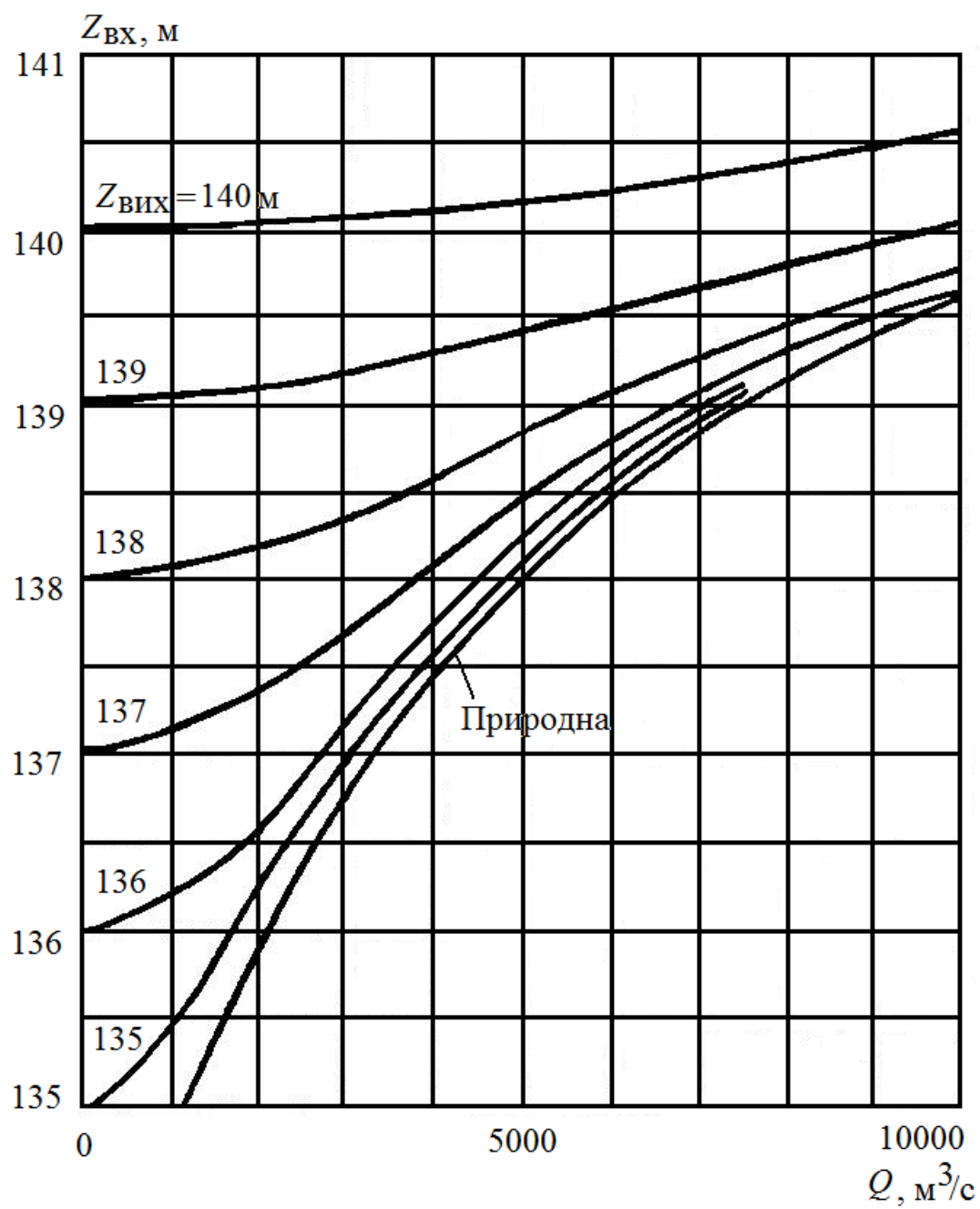


Рис. 6.4 – Номограма $Q = f(Z_{ex}, Z_{eux})$

даного інтервалу часу є початковими для наступного). Два інших елементи, що відносяться до кінцевого інтервалу часу у вхідному перерізі – $Q_{вх.кін}$ і $Z_{вх.кін}$, задані попереднім розрахунком (для самої верхньої ділянки вони задані граничними умовами у вхідному перерізі).

Таким чином, з восьми елементів, які входять в рівняння гідравліки несталоного режиму, шість визначаються початковими умовами і попереднім розрахунком.

Інші два елементи виходять в результаті сумісного вирішення рівнянь динамічної рівноваги і нерозривності.

Розрахунок регулювання паводкового стоку по динамічній ємності водосховища в тому вигляді, як він викладений вище, достатньо складний і вимагає витрати значного часу. Тому в практиці застосовуються і інші методи, що дозволяють систематизувати підбір рішень, які спрощують процес розрахунку.

Питання для самоперевірки

1. Що є основною задачею регулювання паводкового стоку?
2. Які методи розрахунку регулювання паводкового стоку Ви можете назвати?
3. Назвіть основні умови допустимості розрахунків регулювання паводкового стоку по статичній ємності водосховища.
4. Охарактеризуйте схему розрахунків регулювання паводкового стоку по статичній ємності водосховища.
5. Які основні елементи розрахункових паводків Ви знаєте?
6. В чому полягає сутність перерахунку ординат гідрографів-моделей в ординати розрахункових гідрографів?
7. В чому полягає ретрансформація гідрографів? Назвіть основні складові рівняння нерозривності (балансу).
8. Які спрощені схеми розрахунків регулювання паводкового стоку Ви знаєте? Опишіть їхню основну сутність.
9. Охарактеризуйте схему розрахунків регулювання паводкового стоку по динамічній ємності водосховища.

7 КАСКАДНЕ НЕЗАЛЕЖНЕ І КОМПЕНСУЮЧЕ РЕГУЛЮВАННЯ

7.1 Каскадне регулювання

Стрімкий розвиток народного господарства колишнього СРСР обумовив необхідність спорудження на багатьох річках низки установок і

водосховищ. Сукупність установок, послідовно розташованих сходами вздовж течії будь-якої річки, носить назву **каскаду установок** (наприклад, на р. Дніпро, р. Волзі, р. Іртиші, р. Ангарі та ін.).

Умови роботи каскадно розташованих установок відрізняються від умов ізольовано працюючих установок.

Відмінність полягає в тому, що кожна нижче розташована установка використовує стік, що пройшов через вище розташовані установки і, який піддався їхньої дії. В результаті, по-перше, сумарний використовуваний ними стік зменшується через вилучення води на потреби різних галузей народного господарства (водопостачання, зрошування та ін.) і втрат на випаровування і, по-друге, стік перерозподіляється в часі.

Якщо з вище розташованих установок великих вилучень води і втрат на випаровування не має, а стік перерозподіляється значно, вплив таких установок на нижче розташовані сприятливий. В цьому випадку умови роботи нижче розташованих водосховищ опиняються більш легкими, оскільки в контрольованому ними стоці відбитий вплив регулювання вище розташованими водосховищами.

Ступінь впливу регулювання вище розташованих водосховищ на нижче розташовані залежить як від співвідношення корисних ємностей кожного з них, так і від співвідношень величин стоку: з повного і з проміжного (часткового) водозбору між створами вище і нижче розташованих установок.

При енергетичному використанні водотоку і якщо підпір нижче лежачої сходуни поширюється до створу вище лежачої сходуни, нижче лежача впливає на напори вище лежачої сходуни. Таким чином, при каскадному використанні відносно регулювання стоку вище розташовані сходуни впливають на нижче розташовані, а відносно напорів має місце вплив нижче лежачих на вище лежачі установки.

У зв'язку зі взаємним впливом установок, що працюють в каскаді, визначення їхніх параметрів і розробка режиму експлуатації повинна вестися спільно.

Оскільки каскад установок може розташовуватися не лише на основному водотоці, але і на його притоках, в проектах повинен також враховуватися взаємний вплив і установок на притоках. Прикладом схеми з установками на основній річці та на її притоках може служити Волга з Камою.

Розрізняють два види каскадного регулювання. Якщо кожна установка веде регулювання на задоволення запитів безпосередньо прикріплених до неї споживачів, таке регулювання можна назвати **незалежним**. Коли ж установки ведуть регулювання, підпорядковуючи режим умовам роботи інших установок або всього каскаду в цілому, – **компенсуючим**. Компенсуюче регулювання найчастіше застосовується при роботі каскадів гідроелектростанцій, оскільки його задачею є покриття

загального графіка навантаження енергосистеми. Однак нерідко компенсуюче регулювання застосовується і до каскаду, що забезпечує споживачів водою.

Розрахунки регулювання каскаду установок, як правило, ведуться по календарних гідрологічних рядах, тому що складну взаємодію водосховищ утрудняє аналіз розподілу імовірності величин стоку і наповнень водосховищ. Тому узагальнені прийоми водогосподарських розрахунків каскадів переважно застосовуються для наближеної оцінки ефекту регулювання.

7.2 Розрахунки каскадного незалежного регулювання по календарних гідрологічних рядах

При незалежній роботі установок каскаду розрахунки регулювання розпочинаються з самого верхнього за течією річки водосховища і послідовно переносяться на кожну нижче лежачу установку. Таким послідовним розрахунком враховується сумарний вплив регулювання всіма вище розташованими водосховищами на нижче розташовані, на яке потім накладається регулювання власним водосховищем.

Для виконання розрахунків регулювання по календарних гідрологічних рядах необхідно мати або інтегральні криві, або таблиці витрат в створах кожної установки каскаду за розрахунковий період (роки). При цьому як інтегральні криві, так і таблиці витрат повинні характеризувати повні величини стоку в створах цих установок, тобто зі всієї вище лежачої площі водозбору. При табличному способі розрахунку, крім того, необхідно мати величини витрат з часткових водозборів по кожному водосховищу.

Припустимо, що каскад складається з трьох установок. Водосховищем верхньої контролюється стік, що дорівнює 37 %, а середньої 69 % стоку в створі греблі нижнього водосховища. Ємності водосховищ дозволяють здійснювати сезонне регулювання стоку.

На рис. 7.1 наведені інтегральні криві стоку в створах верхньої (*a*), середньої (*b*) і нижньої (*в*) гребель за розрахунковий маловодний рік. Величини ємностей водосховищ відповідно дорівнюють 0,50, 0,44 і 0,36 км³. Будемо вирішувати задачу регулювання за простою схемою – на постійну витрату.

Спочатку розрахунок регулювання виконується на інтегральній кривій припливу до верхнього водосховища (*a*) при заданій ємності 0,50 км³. За маловодною частиною року визначається зарегульована витрата (лінія *cd*), а потім за визначеною витратою в багатоводну частину року ведеться наповнення водосховища (лінія *ok*). Далі лінія зарегульованих витрат будується паралельно природної інтегральної

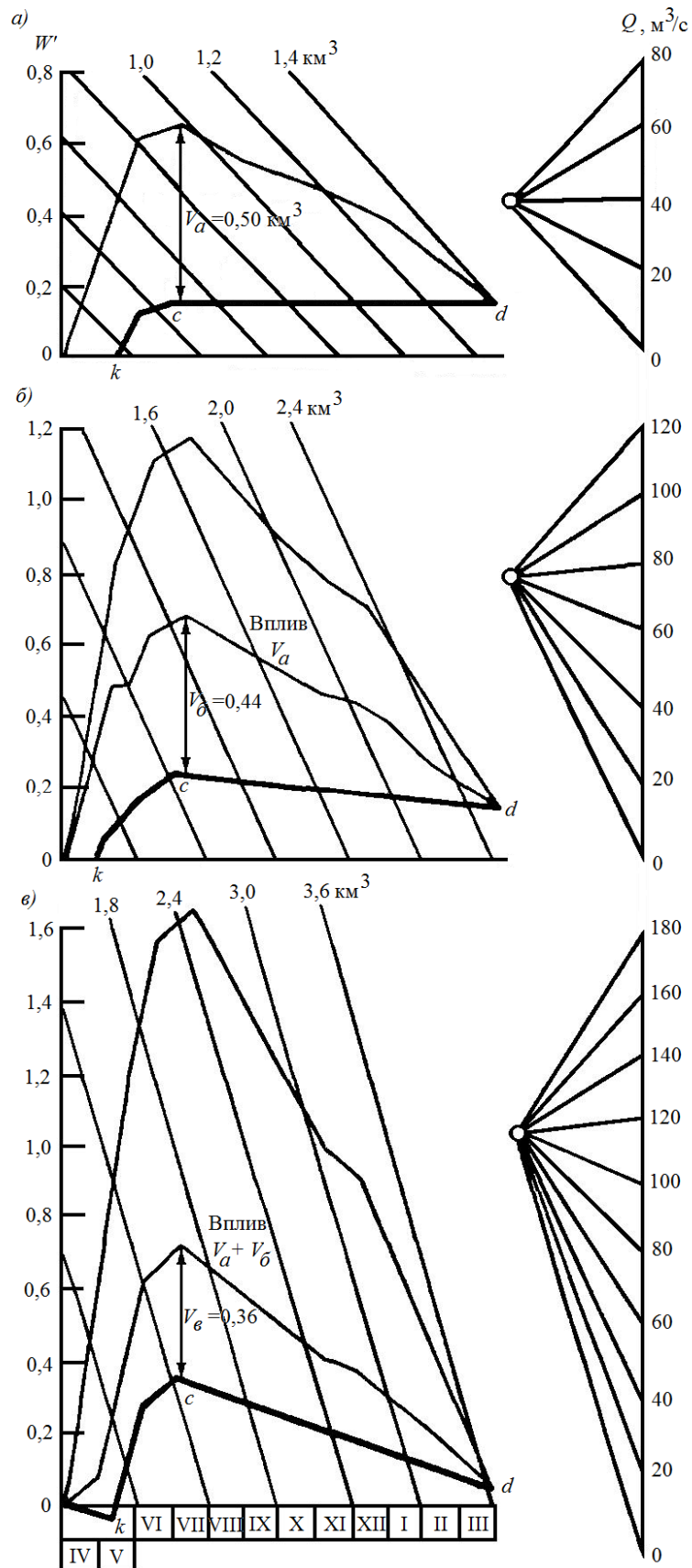


Рис. 7.1 – Схема розрахунку каскадного незалежного регулювання при трьох водосховищах

кривої до зімкнення з точкою c . У точці c водосховище починає спрацьовуватися, а закінчується спрацювання в точці d . Лінія $okcd$ є інтегральною кривою зарегульованих витрат в створі греблі верхнього водосховища.

Для того, щоб приступити до розрахунків регулювання середнім водосховищем, необхідно на інтегральній кривій (δ), що характеризує витрати в природному стані річки, відбити вплив роботи верхнього водосховища. Вплив виражається в тому, що в певні періоди частина стоку виявляється затриманою у верхньому водосховищі і, отже, такою, що не надійшла до нижче лежачого середнього водосховища. Тому зменшенням ординат інтегральної кривої природного стоку на об'єми води, що містяться у верхньому водосховищі, і буде одержана інтегральна крива припливу (δ , лінія V_a) до середнього водосховища, яка враховує роботу верхнього водосховища (рис. 7.1 δ).

По виправленій таким чином інтегральній кривій і ведеться розрахунок регулювання середнім водосховищем. Цей розрахунок нічим не відрізняється від тільки що виконаного розрахунку по верхньому водосховищу: за маловодною частиною року при заданій ємності $0,44 \text{ км}^3$ визначається зарегульована витрата (лінія cd), потім розраховується наповнення водосховища (лінія ok) і далі будується лінія до зімкнення з точкою c , що характеризує роботу водосховища при заповненій ємності, тобто на припливних витратах (лінія kc).

Для виконання розрахунків регулювання нижнім водосховищем необхідно на інтегральній кривій (ϵ) природного стоку відбити сумарний вплив роботи верхнього і середнього водосховищ шляхом зменшення її ординат на об'єм води, що міститься в обох вище лежачих водосховищах. Далі по виправленій інтегральній кривій (лінія $V_a + V_\delta$) здійснюється розрахунок регулювання нижнім водосховищем: визначається при заданій ємності $0,36 \text{ км}^3$ зарегульована витрата (лінія cd), розраховується наповнення (лінія ok) і т.п.

У викладеній вище послідовності ведуться розрахунки регулювання і за наявності в каскаді більшого числа водосховищ.

При каскаді установок можуть мати місце випадки, коли в результаті роботи вище розташованих водосховищ навіть із сезонним регулюванням нижче розташовані водосховища, незважаючи на невеликі розміри своєї ємності, в змозі здійснювати багаторічне регулювання. У такому випадку, коли одне або декілька водосховищ ведуть багаторічне регулювання, розрахунки необхідно виконувати по гідрологічному періоду. Цей період повинен відповідати вимогам, які ставляться до нього відповідно до масштабів здійснюваного багаторічного регулювання.

У розрахунках регулювання каскадно розташованих водосховищ підлягає врахуванню час добігання води від одного створу до іншого. Практичне врахування часу добігання зводиться до того, що, взявши за

основу будь-який певний створ, у всіх інших створах витрати за розрахунковий інтервал часу (місяць, декада і т.д.) беруться в зрушених календарних межах. Наприклад, якщо каскад складається з трьох установок і за основу взятий створ нижньої і якщо час добігання від верхньої до середньої установки дорівнює 3 дням, а від середньої до нижньої – 5 дням, то при розрахунках регулювання за середньодекадними значеннями витрат декади необхідно брати, наприклад, відповідно в таких межах: у створі верхньої установки – з 13 по 22-е число, в створі середньої – з 16 по 25-х і в створі нижньої – з 21 по 30-е число місяця.

Послідовність розрахунків каскадного незалежного регулювання, викладена стосовно графічного методу (інтегральних кривих), зберігається і при табличному розрахунку.

7.3 Прийоми узагальнених розрахунків каскадного незалежного регулювання

Методів суворого узагальненого розрахунку каскадного незалежного регулювання ще не розроблено. Нижче викладаються прийоми, що дозволяють визначити наближені значення параметрів багаторічного регулювання каскадно розташованих водосховищ. Вони засновані на застосуванні тих же залежностей між параметрами регулювання і стоком, які використовуються при розрахунках багаторічного регулювання ізольовано працюючих водосховищ.

Ступінь впливу регулювання стоку вище розташованих водосховищ на водогосподарські показники нижче розташованих (забезпечений мінімум і середню величину віддачі) залежить, як вже відзначалося, від низки факторів і в першу чергу від співвідношень між величинами стоку з часткових водозборів і ємностями водосховищ.

Роздивимось каскад, що складається з двох водосховищ, які здійснюють різну глибину багаторічного регулювання. При синхронному стоці з часткових водозборів і при однаковій забезпеченості віддачі водосховище, що має більш високу відносну ємність β , наповнюється доверху лише в періоди, коли менш ємне водосховище також є повним. Відповідно холості скиди води з більш ємного водосховища відбуваються лише в ті періоди, коли менш ємне водосховище також скидає воду. Тобто якщо більшу відносну ємність має верхнє водосховище, то холості скиди не використовуються нижньою установкою, оскільки в цей період низове водосховище доверху наповнене і робить скиди. В цьому випадку роль низового водосховища зводиться лише до регулювання стоку з часткового водозбору. Коли ж відносна ємність верхового водосховища є меншою, ніж низового, холостий скид з верхового водосховища буде регулюватися низовим. Інакше кажучи, частина ємності нижнього водосховища як би

виділяється для регулювання стоку з верхнього часткового водозбору.

Відповідно до запланованого співвідношення і ведуться розрахунки регулювання. При цьому розрахунки верхнього водосховища в обох випадках виконуються таким же чином, якби воно працювало не в каскаді, а ізольовано: за параметрами річного стоку \bar{Q}_B , C_v і C_s і заданій багаторічній складовій ємності водосховища, β_B , користуючись графіками Плешкова або Іванова, або ін., визначається коефіцієнт регулювання α_B (або за заданим α_B одержується багаторічна складова ємності β_B) і звичайним шляхом – сезонна складова ємності, а за їхньою сумою встановлюється повна корисна ємність V_B .

Розрахунки низового водосховища виконуються в залежності від ролі верхнього водосховища, як це викладається нижче.

Верхове водосховище має більшу відносну ємність

Оскільки стік \bar{Q}_B верхнього водосховища використовується і на низовій сходинці зарегульована витрата Q_p в її створі як би складається з двох частин: з Q_p^B , що надходить згори (зі ступенем зарегульованості α_B) і витрати з часткового водозбору зарегульованого низовим водосховищем Q_p^H (зі ступенем зарегульованості α_H). Остання розраховується також, як і α_B , тільки за своєю багаторічною складовою ємності водосховища β_H і часткового стоку \bar{Q}_H , C_v і C_s . Одержані в результаті самостійного розрахунку зарегульовані витрати з верхнього і низового водосховищ потім підсумовуються

$$Q_p = Q_p^B + Q_p^H = \alpha_B \bar{Q}_B + \alpha_H \bar{Q}_H. \quad (7.1)$$

Верхове водосховище має меншу відносну ємність

Коли $\beta_B < \beta_H$ нижнє водосховище, як зазначалося вище, залучатиме до регулювання, окрім свого часткового стоку, і частину стоку, що надходить з верхнього водосховища. У такому випадку розрахунок низового водосховища слід виконувати за сумарною ємністю обох водосховищ – верхнього і низового, тобто за $V_B + V_H$ і за сумарним стоком $\bar{Q} = \bar{Q}_B + \bar{Q}_H$ і його параметрами C_v і C_s , використовуючи ті ж залежності, що і при розрахунку окремих водосховищ. Зарегульована витрата в низовому створі для цього випадку складатиме

$$Q_p \alpha \bar{Q}. \quad (7.2)$$

Наведений вище розрахунок стосувався лише питання визначення гарантованої віддачі α в низовому створі. Що стосується повноти використання стоку, яка характеризується коефіцієнтом η , то ця повнота як для верхової установки, так і для низової при $\beta_B < \beta_H$ визначається способом, викладеним в розділі 5. При $\beta_B > \beta_H$ для визначення ступеня використання стоку на низовій установці С.Н. Крицький та М.Ф. Менкель рекомендують такі наближені формули, в яких пропускна здатність пристроїв низової установки, що підводять воду, q (турбін, насосів і т.д.) умовно поділяється на частини, які використовують стік верхового q_B і низового q_H часткових водозборів:

для верхового водозбору

$$q_B = \frac{q(1 - \alpha_B) + \bar{Q}_H(\alpha_B - \alpha_H)}{\bar{Q}_H(1 - \alpha_H) + \bar{Q}_B(1 - \alpha_B)} \bar{Q}_B, \quad (7.3)$$

для низового водозбору

$$q_H = \frac{q(1 - \alpha_H) + \bar{Q}_B(\alpha_H - \alpha_B)}{\bar{Q}_H(1 - \alpha_H) + \bar{Q}_B(1 - \alpha_B)} \bar{Q}_H, \quad (7.4)$$

Тут $q_B + q_H = q$

За величинами q_B і q_H визначаються коефіцієнти продуктивності δ_B і δ_H , що характеризують умови використання стоку низовою установкою, який надходить з верхнього і нижнього часткових водозборів. Далі за номограмами $\eta = f(\alpha, \delta)$ визначаються значення коефіцієнтів використання стоку η_B і η_H , а за ними середні використовувані витрати води $\eta_B \bar{Q}_B$ і $\eta_H \bar{Q}_H$. Сума цих витрат і дає шукану середню багаторічну величину витрати, що використовується низовою установкою

$$\eta \bar{Q} = \eta_B \bar{Q}_B + \eta_H \bar{Q}_H. \quad (7.5)$$

7.4 Компенсуюче регулювання

Схема регулювання, при якій кожне водосховище забезпечує певний мінімум віддачі для задоволення власних споживачів (незалежне регулювання), відповідає найбільшому ефекту регулювання на верховому водосховищі. Ця схема, проте, не забезпечує найбільшого ефекту відносно величин гарантованих витрат в створах нижніх сходинок каскаду.

Вказаний найбільший ефект може бути одержаний лише за наявності свободи маневрування ємностями водосховищ. Така свобода передбачає спорожнення насамперед низових водосховищ, оскільки це дає можливість затримувати надлишковий стік з будь-якої частини водозбору і за рахунок цього збільшувати гарантований мінімум зарегульованих витрат на низових створах. Втім при енергетичному використанні водотоку, коли рівнями водосховищ визначаються напори ГЕС, повна свобода маневрування ємностями низових водосховищ може і не дати найбільшого ефекту. У подібних умовах цей ефект можна одержати шляхом деякої зміни послідовності спрацювання водосховищ каскаду. Доцільна послідовність спрацювання водосховищ визначиться спеціальним розрахунком (розділ 4).

Режим регулювання, який зацікавлений в одержанні найбільшої зарегульованої витрати в низових створах або найбільшої гарантованої потужності в цілому по каскаду, називають, як вже відмічалось, **компенсуючим**.

Проста схема компенсуючого регулювання буде являти собою каскад, що складається з двох установок, причому тільки верхня має в своєму розпорядженні ємність, достатню для регулювання стоку, а нижня лише забезпечує подачу води споживачам.

Розділимо стік, що надходить до створу нижньої установки, на дві частини: з водозбору, який контролюється водосховищем, і з проміжного водозбору між створами верхньої і нижньої установок. Припустимо, необхідно в створі нижньої установки забезпечити регулюванням постійну витрату q . Тоді, використовуючи насамперед стік з нерегульованого водозбору, визначимо ту частину витрати q , яка не може бути покрита цим стоком. У кожний момент ця величина дорівнює різниці між q і нерегульованою витратою. У моменти ж, коли витрати з нерегульованого водозбору перевищують задану витрату споживання q , є надлишки, які підуть в скид. У період надлишкового стоку з нерегульованого водозбору водосховище акумулює стік, що надходить до нього, і наповнюється, а в періоди недостачі – спрацьовується, доповнюючи до витрат з проміжного водозбору бракуючу до заданої витрати q величину попуску.

Розрахункову схему компенсуючого регулювання одним водосховищем легко зрозуміти з рис. 7.2.

Нехай гідрограф $Q_A = f(T)$ характеризує повний стік в замикальному створі нижньої установки, а гідрограф $Q_B = f(T)$, побудований над витратою споживання q , – приплив до водосховища. При $Q_A > q$ є надлишки, при $Q_A < q$ – дефіцит. Якщо повні надлишки перевищують приплив до водосховища Q_B (наприклад, у момент 1-1), мають місце скиди, які усунути неможливо, так як вони формуються з

неконтрольованої водосховищем площі водозбору. У момент 2-2 надлишки дорівнюють припливу до водосховища і, якщо воно до цього часу не буде заповнено, скиди виключаються. З моменту 3-3 починається спрацювання водосховища, яке ведеться витратами, що дорівнюють дефіциту Q_d , а попуски з водосховища Q дорівнюють сумі дефіциту і витрати припливу

$$Q = Q_d + Q_B. \quad (7.6)$$

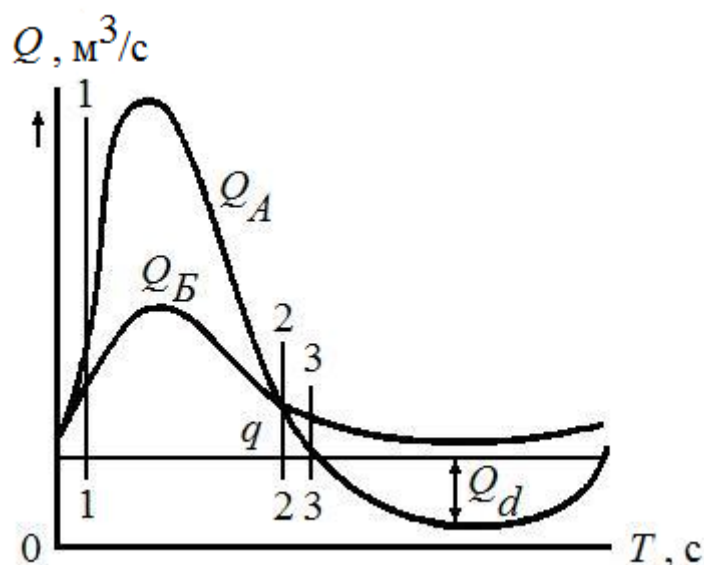


Рис. 7.2 – Розрахункова схема компенсуючого регулювання одним водосховищем

Режим роботи водосховища з повним припиненням попусків при надлишках витрат з неконтрольованого водозбору зазвичай не можна допускати, оскільки це призводить до обезводнення нижче лежачої ділянки річки. Якщо на цій ділянці виконується водозабір на потреби водопостачання, зрошування або здійснюється водний транспорт і т.д., необхідно передбачити будь-який обов'язковий попуск. Мінімальна величина цього попуску за відсутності спеціальних вимог з боку згаданих галузей народного господарства визначиться санітарними умовами. Санітарна витрата попуску зазвичай береться не нижчою за мінімальну природну витрату. На величину обов'язкового попуску будуть збільшені непродуктивні скиди в створі низової установки.

У зв'язку із значними коливаннями витрат води з неконтрольованого водозбору значно коливатимуться і витрати попусків з водосховища, знижуючись в багатоводні періоди до мінімального обов'язкового.

Для здійснення компенсуючого регулювання необхідна ємність, що

перевищує ту, яка необхідна для вирівнювання власного припливу до водосховища. Відмінність в розмірах необхідних ємностей в залежності від місця розташування і призначень водосховища можна побачити на рис. 7.3.

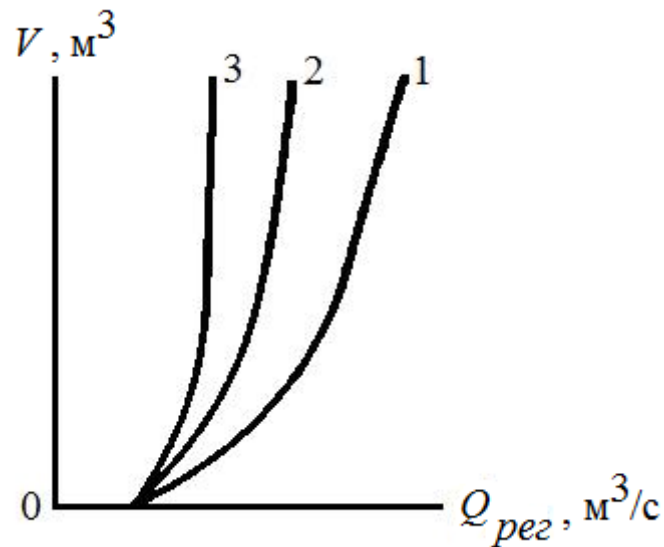


Рис. 7.3 – Залежність віддачі від ємності водосховища

Умовні позначення: 1 – водосховище низової установки,
 2 – водосховище верхової установки, що працює за компенсуючим режимом,
 3 – водосховище верхової установки, що регулює свій приплив на постійну витрату

На рисунку дані криві залежності гарантованих витрат в низовому створі заданої забезпеченості від ємності водосховища. Крива 1 відповідає водосховищу, контролюючому стік в низовому створі (Q_A). При значній ємності таке водосховище в змозі зарегулювати стік до середньої багаторічної витрати \bar{Q}_A . Крива 2 відповідає схемі компенсуючого регулювання водосховищем, яке контролює 30 % стоку в створі A . Таке водосховище не в змозі зарегулювати стік до середньої багаторічної витрати \bar{Q}_A навіть при дуже великій його ємності. Крива 3 характеризує вплив водосховища, яке контролює той же 30 %-вий стік, але працює за схемою на вирівнювання власного припливу Q_B . Найбільша величина зарегульованої витрати в цьому випадку виявляється ще меншою, ніж при компенсуючому регулюванні. Всі криві починаються в точці з мінімальною природною витратою в створі A . Розходження кривих є тим більшим, чим меншу частку стоку за відношенням до створу A контролює

водосховище.

Наступним етапом на шляху вивчення компенсуючого регулювання є розглядання випадку, коли низова установка також має можливість самостійно вести регулювання. У розрахунковому відношенні цей випадок виявляється більш складним. Однак загальні принципи підходу до вирішення задачі компенсуючого регулювання за наявності двох і навіть більшої кількості водосховищ залишаються такими ж, які були викладені стосовно схеми з одним верховим водосховищем.

7.5 Розрахунки компенсуючого регулювання по календарних гідрологічних рядах

В протилежність розрахункам каскадного незалежного регулювання розрахунки компенсуючого регулювання починаються з нижньої установки, в якій задано споживання і послідовно переносяться на вище розташовані (рис. 7.4).

Роздивимось каскад, що складається з двох установок причому як і раніше вважатимемо, що все регулювання (сезонне) зосереджене у верховому водосховищі, а нижня установка лише забезпечує подачу води споживачам. Водосховище контролює стік, що в середньому становить 53 % стоку в замикальному створі нижньої установки. Гідрологічні характеристики задані у вигляді інтегральних кривих за розрахунковий маловодний рік (рис. 7.4) в створах верхової (*Б*) і низової установок (*А*) зі всього вище лежачого водозбору.

Нехай буде задана витрата q , яку необхідно забезпечити регулюванням в створі низової установки. За нахилом (по променевому масштабу) витрати q на інтегральній кривій *А* будується дотична cd і по найбільшій відстані між нею і інтегральною кривою визначається необхідна ємність водосховища V . Оскільки за умовами задачі все регулювання зосереджене на верховому водосховищі, виконаний розрахунок необхідно перенести на інтегральну криву, що характеризує приплив у водосховище (*Б*). Це здійснюється шляхом перенесення відстаней між інтегральною кривою *А* і лінією зарегульованої витрати q . Перенесена на інтегральну криву *Б* лінія cd характеризує витрати попусків з водосховища в маловодну частину року. Як і слід було очікувати, внаслідок нерівномірності стоку з неконтрольованого водозбору лінія попусків виявляється ламаною. Друга частина задачі – наповнення водосховища – полягає в наступному. Продовжуючи розрахунок на інтегральній кривій в створі низової установки і будуючи від початку її лінію тієї ж витрати q , при переході на інтегральну криву *Б* переконуємося в неможливості підтримати в створі *А* задану витрату q .

Це виходить з того, що сумарні надлишки ab в створі A перевищують об'єм максимальної акумуляції стоку у водосховищі ab' , навіть якщо стік з нього буде повністю припинений (лінія Oo). Таке положення обумовлюється дуже високим стоком з неконтролюючого водозбору. Таким чином, вже з самого початку водопілля, коли водосховище ще не заповнене, на низовому створі доводиться робити холості скиди води.

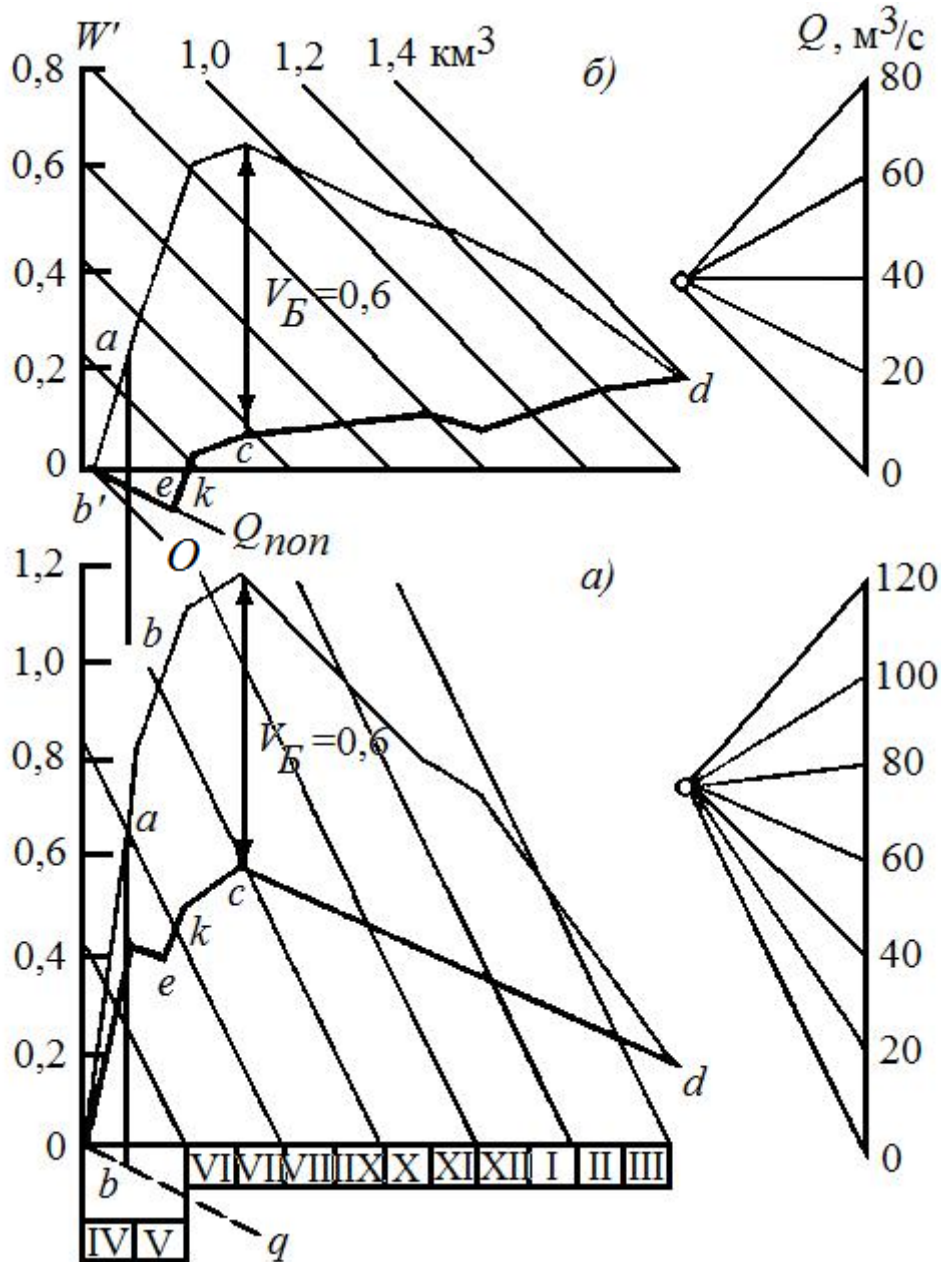


Рис.7.4 – Схема розрахунку компенсуючого регулювання одним водосховищем

При вказаних обставинах для періоду водопілля розрахунок необхідно починати з верхового створу, даючи попуски у розмірі

обов'язкового мінімуму Q_{non} .

Потім вертикальні відстані між інтегральною кривою B і лінією витрати попуску з водосховища Q_{non} , що характеризують наповнення водосховища на деякі моменти часу, переносять на інтегральну криву A і визначають хід зарегульованого стоку в створі A .

Попуск Q_{non} зберігається до моменту заповнення всієї ємності (точка e), якщо стік з нерегульованого водозбору продовжує бути великим. Далі лінії зарегульованих витрат як для верхової (B), так і для низової (A) установок йдуть паралельно основних інтегральних кривих (ek) до зімкнення з точкою c , звідки починається спрацювання водосховища в маловодну частину року.

Якщо низова установка також має в своєму розпорядженні ємність водосховища і веде регулювання свого часткового стоку, послідовність розрахунків не змінюється. Різниця полягає в тому, що визначена на інтегральній кривій A за заданою витратою q ємність розподіляється між двома водосховищами A і B .

Покажемо на конкретному прикладі табличний розрахунок сезонного компенсуючого регулювання двома водосховищами на задану витрату в низовому створі, що дорівнює $390 \text{ м}^3/\text{с}$ (брутто).

Верхове водосховище контролює 43 % повного стоку в низовому створі. Частковий стік низового водосховища, отже, складає 57 %. Гідрологічні дані являють собою середні місячні витрати за розрахунковий маловодний 1920/21 р. Оскільки водопілля починається в середині квітня, витрата цього місяця поділена на дві половини, в першій з яких прийнята витрата березня; витрата другої половини встановлена за рештою частиною стоку квітня.

Розрахунок ведеться з кінця водогосподарського року ходом назад (табл. 7.1). За різницею між витратами повного припливу до низового створу (графа 4) і заданою витратою $390 \text{ м}^3/\text{с}$ (графа 5) визначаються недостачі (дефіцити, графа 6). За недостачами обчислюються об'єми води, що запозичуються з обох водосховищ (графа 7), підсумовуванням яких встановлюються необхідні на кінець розрахункових інтервалів запаси води (наповнення) водосховищ (графа 8). Найбільшою величиною наповнення (у нашому прикладі $4,51 \text{ км}^3$) визначається необхідна корисна ємність обох водосховищ.

Поділ ємності між верховим і низовим водосховищами має бути виконаний на підставі техніко-економічних зіставлень різних варіантів. Якщо в техніко-економічному відношенні умови створення водосховищ однакові, а також на попередніх стадіях проектування, ємність можна поділити пропорційно контрольованому стоку – на верхове водосховище 43 %, або $1,94 \text{ км}^3$, і на низове – 57 %, або $2,57 \text{ км}^3$. У такому ж співвідношенні можуть бути поділені і необхідні запаси води водосховищ

Таблиця 7.1 – Розрахунки компенсуючого регулювання

Дата (розрахунковий інтервал)	Витрати, м ³ /с					Об'єми води, км ³				Верхове водосховище		
	приплив у створах			зарегульовані в низовому створі	недостача (+) до зарегульованої або накопичення (-) в низовому водосховищі	запозичений з водосховища (+) або накопичений в низовому водосховищі (-)	наповнень водосховищ на кінець інтервалу			об'єм, запозичений (+) або накопичений (-), км ³	витрати, м ³ /с	
	верховому	частковий низовому	повний низовому				сумарно	верхового	низового		запозичений (+) або накопичений (-), км ³	попуск
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1920 р.												
IV-2	196	761	955	390	491	0,65		0,10	0,65	0,10	76	120
V	335	766	1101	390	496	1,30		0,66	1,95	0,56	215	120
VI	604	585	1189	469	236	0,62		1,93	2,57	1,27	484	120
VII	383	279	662	658	-	-		1,94	2,57	0,01	4	379
VIII	198	197	395	395	-	-	4,51	1,94	2,57	-	-	198
IX	111	154	265	390	-125	-0,33	4,18	1,80	2,38	-0,14	-53	164
X	89	162	251	390	139	0,37	3,81	1,64	2,17	0,16	61	150
XI	78	83	161	390	229	0,60	3,21	1,38	1,83	0,26	99	177
XII	55	65	120	390	270	0,71	2,50	1,07	1,43	0,31	118	173
...

(графа 9 і 10). Далі розраховуються величини попусків (графа 13) з верхового водосховища за сумою припливних (графа 2) і запозичених з нього (графа 12) витрат. У цих же графах ведеться і розрахунок наповнення верхового водосховища при врахуванні заданого мінімального попуску (у нашому прикладі $120 \text{ м}^3/\text{с}$). Розрахунок наповнення низового водосховища виконаний в графах 7 і 8. Спочатку визначаються витрати припливу до нього за сумою природних витрат з часткового водозбору (графа 3) і попусків з верхового водосховища (графа 13, наприклад, в 2-й половині квітня $761+120=881 \text{ м}^3/\text{с}$), виключенням з яких зарегульованої витрати (графа 5) одержані акумулюючі витрати в низовому водосховищі (графа 6) і відповідні ним об'єми (графа 7). Після наповнення водосховищ до встановлених меж здійснюється перехід на роботу по припливу при доверху заповнених ємностях (табл. 7.1).

У викладеній послідовності виконуються графічні і табличні розрахунки компенсуючого сезонного регулювання та при більшій кількості водосховищ, а також розрахунки компенсуючого багаторічного регулювання стоку при різній кількості водосховищ.

Питання для самоперевірки

1. Яке регулювання називається каскадним?
2. Які два види каскадного регулювання Ви знаєте?
3. Охарактеризуйте основні положення розрахунків каскадного незалежного регулювання.
4. Поясніть розрахункову схему компенсуючого регулювання одним водосховищем.
5. В чому полягає основна сутність розрахунків компенсуючого регулювання?

ЛІТЕРАТУРА

1. Бахтиаров В.А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 431 с.
2. Плешков Я.Ф. Регулирование речного стока. Водохозяйственные расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 507 с.
3. Арсеньев Г.С., Иваненко А.Г. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – С-Пб: Гидрометеиздат, 1993 – 269 с.
4. Иваненко О.Г., Чернов М.І., Даус М.Є. Розрахунки регулювання стоку: Навчальний посібник. – Одеса: «ТЭС», 2002. – 53 с.

О.Г. ІВАНЕНКО,

М.В. ЗАХАРОВА

ВОДОГОСПОДАРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

Навчальне видання

Іваненко Олександр Григорович

Захарова Марина Володимирівна

ВОДОГОСПОДАРСЬКІ РОЗРАХУНКИ

Конспект лекцій

Підп. до друку
Умовн. друк. арк.

Формат 60×84/16
Тираж 100

Папір офс.
Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет
65016, Одеса, вул. Львівська, 15
