

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**Федеральное государственное образовательное учреждение**

**высшего профессионального образования**

**«ДАГЕСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ:  
РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА**

**Курс лекций**

**Махачкала 2009**

УДК 556.18:631.6.02

Гаджиев М.К.

Основы рационального природопользования: Регулирование речного стока. Курс лекций. Махачкала, ДГТУ, 2010. - 100 с.

Рассматриваются вопросы, включенные в программу раздела «Регулирование стока» дисциплины «Основы рационального природопользования», для студентов, обучающихся по направлению подготовки 280400 – «Природообустройство», специальность 280401 - «Мелиорация, рекультивация и охрана земель». Курс лекций подготовлен в полном соответствии с государственным образовательным стандартом.

Изложены основы водохозяйственных расчетов и практических приемов регулирования речного стока. Большое внимание уделяется видам регулирования стока (суточному, недельному, сезонно-годовому и многолетнему), типам водохранилищ, трансформации паводков водохранилищами, экологическим проблемам строительства и эксплуатации водохранилищ.

Рецензенты: ст. преп. ДГТУ, к.т.н. Гусейнова М.Р.

начальник отдела водного хозяйства Западно-Каспийского БВУ  
Абдулкаримов А.Ш.

Печатается по решению Совета ГОУ ВПО «Дагестанский государственный технический университет» от 2009 г., протокол № .

## Введение

Предлагаемый вниманию читателей курс лекций по регулированию речного стока написан в соответствии с программой по направлению подготовки 280400 – «Природообустройство» для специальности 280401 - «Мелиорация, рекультивация и охрана земель» согласно Государственному образовательному стандарту и рабочей программы дисциплины.

Текст данного пособия возник в результате опыта чтения курса «Регулирование речного стока» на гидротехническом факультете Дагестанского государственного технического университета. При подготовке пособия использованы учебники и учебные пособия ученых Московского государственного университета природообустройства (А.Н. Иванов, Е.Е. Овчаров, Т.А. Неговская и другие) и классические работы по регулированию речного стока (С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель, Плешков Я.Ф., М.В. Потапов, Д.Я. Раткович и другие).

Учебное пособие включает 9 тем в соответствии с рекомендованной рабочей учебной программой.

В последнее время курс «Регулирование речного стока» входит как раздел в дисциплину «Основы рационального природопользования».

Целью изучения данной дисциплины является получение студентами необходимого объема знаний для подготовки специалистов в области оценки природных ресурсов, их охраны, воспроизводства и оптимизации использования с учетом интересов окружающей среды.

Природопользование – комплексная научная дисциплина. Изучение ее разделов идет по следующим направлениям:

1. Биосфера и человек.
2. Земельные ресурсы России.

3. Леса России.
4. Водные объекты и водные ресурсы.
5. Регулирование речного стока.

В данном пособии даются лекции только по разделу «Регулирование речного стока», другие разделы не рассматриваются.

Очевидную невозможность изложения в кратком курсе лекций всех научных разработок восполняет список рекомендуемой литературы, в который включены наиболее полные, известные и доступные учебники и монографии.

Первые попытки регулировать сток предпринимались еще во времена ранних цивилизаций: строились различные запруды, пруды и водоемы для целей сельского хозяйства, водоснабжения, орошения, лесосплава, водопоя скота и т.д. в районах.

В настоящее время, как и ранее, основным источником для удовлетворения потребностей населения и отраслей экономики в воде служат поверхностные водные ресурсы (речной сток). Однако наиболее полному и рациональному использованию речного стока препятствуют значительные годовые и многолетние колебания водности рек. Базировать обеспечение водой различных отраслей экономики на естественном резко изменчивом стоке можно лишь в очень ограниченных пределах. Естественный режим речного стока не совпадает по времени с требованиями, предъявляемыми различными отраслями экономики. Каждая отрасль хозяйства имеет свои специфические особенности (технология, цикличность) и лимитирующие периоды. Регулирование стока рек является основным техническим приемом, позволяющим не только использовать водные ресурсы или приспособить их к планируемой отдаче, но и бороться с наводнениями.

## Лекция 1. Задачи и виды регулирования речного стока

1. Необходимость регулирования речного стока
2. Классификация видов регулирования речного стока

### 1. Необходимость регулирования речного стока

Водные ресурсы в нашей стране, как и на Земле в целом, огромны. Однако их распределение по территории и во времени неравномерно и не согласуется с интересами народного хозяйства.

В России примерно 80 % поверхностных вод сосредоточено в северных и восточных районах, прилегающих к бассейнам Северного Ледовитого и Тихого океанов. Сток таких рек, как Обь, Енисей, Лена, Амур, составляет более 40 % годового стока всех рек страны. На западные и южные районы, где сосредоточено около 80% населения, промышленного и сельскохозяйственного производства, приходится менее 14 % водных ресурсов страны. Средний сток на одного жителя в наиболее развитых районах страны составляет 3 тыс. м<sup>3</sup>/год, а на юге всего 0,2 - 1,6 тыс. м<sup>3</sup>/год, в то время как в среднем по России на одного человека приходится в год 27,4 тыс. м<sup>3</sup> годового объема стока.

Речной сток неравномерен и во времени. Сток большинства рек за короткий период половодья или паводка составляет от 50 до 90% суммарного годового объема. Некоторые реки в засушливые периоды полностью пересыхают, другие промерзают зимой. Наряду с сезонной неравномерностью сток неравномерен и по годам: наблюдается определенная цикличность в чередовании многоводных и маловодных лет и периодов.

Естественный режим речного стока в большинстве случаев не соответствует режиму водопользования. Различные отрасли экономики предъ-

являют свои требования на воду, которые нередко не совпадают между собой, не совпадают с режимом естественного стока, нарушают его и отрицательно сказываются на качестве воды. Таким образом, природный режим речного стока и режим его использования асинхронны. Для их согласования, более полного и рационального использования водных ресурсов в целях бесперебойного и надежного обеспечения водой населения, промышленности и сельского хозяйства необходимо воздействие на естественный режим стока, т. е. его регулирование,

*Под регулированием речного стока* понимают искусственное перераспределение во времени объема стока в соответствии с требованиями водопользования, а также в целях борьбы с наводнениями.

Регулирование стока осуществляется с помощью специальных искусственных водоемов (водохранилищ). Искусственный водоем, образованный водоподпорным сооружением на водотоке с целью хранения воды и регулирования стока, называется *водохранилищем*.

Регулирование стока является весьма важным мероприятием при разрешении очень многих водохозяйственных задач: водоснабжении, обводнении и орошении, использовании водной энергии, улучшении условий судоходства и лесосплава, предупреждения наводнений, селей и т. д. Регулирование стока, позволяющее комплексно использовать водные ресурсы, приобретает важное значение при разработке планов экономического и социального развития страны, размещения производительных сил, охраны природы.

Человек очень давно начал вмешиваться в естественный режим речного стока, перераспределять его в своих интересах. К числу первых попыток регулировать сток может быть отнесено сооружение различного рода запруд, прудов и водоемов для целей сельского хозяйства: водоснабжения, орошения, лесосплава, помола зерна, водопоя скота и т. д. Круп-

ные водохранилища в нашей стране начали сооружать в XVIII в. Однако настоящий размах гидротехническое строительство и регулирование стока получило в XX веке. Крупные водохранилища построены на реках Волге, Каме, Ангаре, и других.

## 2. Классификация видов регулирования речного стока

Виды регулирования стока зависят от климатических условий, плотности населения, степени освоенности территории, экономических и экологических проблем региона и страны. В зависимости от задач, характера и состава водопотребителей применяют различные виды регулирования стока, которые классифицируют по трем основным признакам: по назначению, по продолжительности и по степени регулирования.

По продолжительности различают суточное, недельное, сезонное (годичное) и многолетнее регулирование стока.

*Суточное регулирование* заключается в перераспределении: в течение суток практически равномерного стока реки в соответствии с требованиями потребителей. В часы малого потребления вода накапливается в водохранилище и расходуется из него в часы повышенного потребления. Цикл регулирования (наполнение и сработка) - сутки.

Суточное регулирование наиболее широко распространено в водоснабжении и гидроэнергетике; находит оно применение и в орошении.

Объем водохранилища при суточном регулировании определяют путем сопоставления неравномерного суточного графика водопотребления со средним расходом водопотребления за сутки (рис. 1). Когда средний расход водопотребления  $q_{cp}$  больше расхода по суточному графику  $q$ , водохранилище заполняется, а когда  $q_{cp} < q$  - водохранилище срабатывается. Отношение максимального расхода потребления в течение суток  $q_{max}$  к

среднесуточному  $q_{ср}$ , называют *коэффициентом неравномерности суточного потребления*:

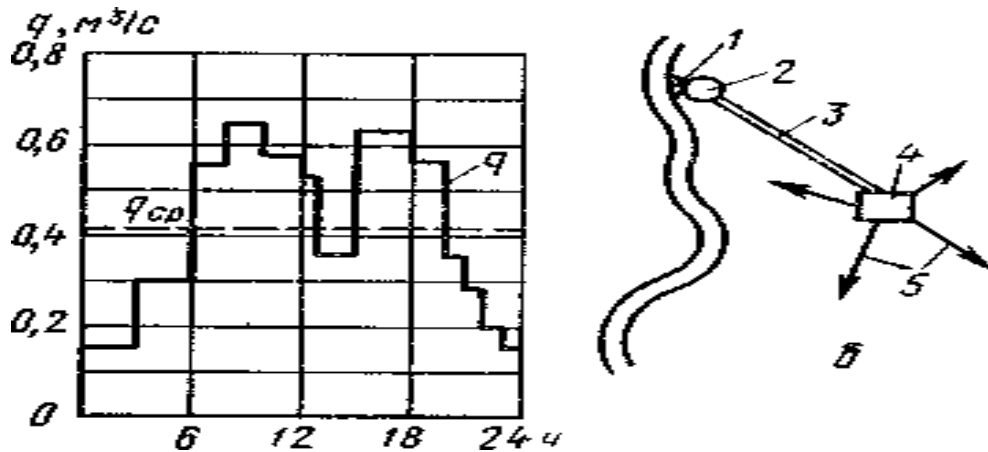


Рисунок 1.1 - Суточное регулирование стока.

а - график водопотребления, б - схема размещения водохранилища суточного регулирования стока; 1 - водозаборное сооружение, 2 - насосная станция, 3 - магистральный канал, 4 - водохранилище суточного регулирования стока, 5 - водоразводящая сеть,

Суточное регулирование позволяет уменьшить размеры и стоимость водозаборного сооружения, насосной станции, водовода (канала или трубопровода), так как сооружения при наличии водохранилища рассчитывают не на максимальный, а на средний расход (см. рис. 1.1б).

Водохранилища суточного регулирования обычно невелики, их полезный объем составляет 15 - 25 % суточного стока реки.

*Недельное регулирование* заключается в перераспределении в течение недели равномерного стока в соответствии с неравномерным потреблением. Перевод большинства предприятий на работу с двумя выходными днями в неделю повысил возможность использования избыточного стока в нерабочие дни для повышения отдачи в рабочие.

Если суточное потребление воды в рабочие дни  $q_1$ , а в нерабочий день  $q_2$ , то при продолжительности недели  $n$  сут, в числе которых два дня нерабочих, общее потребление воды за неделю составит (рис. 1.2):

$$\sum_1^n q = [q_1(n-2) + 2q_2] \cdot 86400 \quad (1.1)$$



Средний расход водопотребления в неделю

$$q_{cp} = [q_1(n-2) + 2q_2] / n \quad (1.2)$$

Объем водохранилища недельного регулирования стока равен объему недоиспользованного стока в два выходных дня, когда водопотребление понижено, т.е.

$$V_{нед} = V_2 = 2 \cdot (q_{cp} - q_2) \cdot 86400 \quad (1.3)$$

Подставив в выражение (4.4) значение  $q_{cp}$  и выполнив простейшие преобразования, окончательно получим

$$V_{нед} = V_2 = 2 \cdot (q_{cp} - q_2) \cdot [(n-2)/n] \cdot 86400 \quad (1.4)$$

Полный цикл при недельном регулировании (наполнение и сработка) равен неделе. Применяется оно в основном в промышленном водоснабжении и гидроэнергетике.

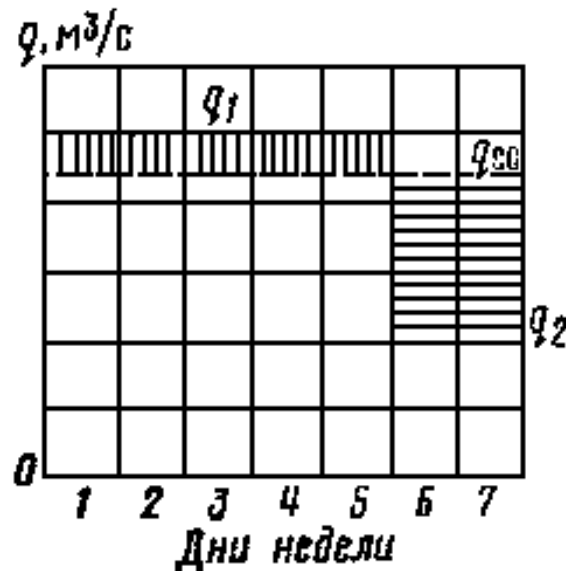


Рисунок 1.2 - Недельное регулирование стока.

*Краткосрочное непериодическое регулирование стока* - это такое регулирование, при котором вода из водохранилища подается в виде краткосрочных непериодических попусков для поддержания расходов или уровней воды на нижележащем участке водотока в соответствии с требованиями водопотребителей. Необходимый объем воды в водохранилище накап-

ливают в течение ряда суток, а сосредоточенный попуск осуществляют в продолжение нескольких часов. Этот вид регулирования применяют преимущественно для создания необходимых глубин при лесосплаве, судоходстве, а также в санитарных, сельскохозяйственных и других целях.

*Сезонное (годовое) регулирование стока* позволяет перераспределить сток в течение сезона или года (рис. 3). Во время половодий и паводков водохранилище наполняют, в период межени срабатывают.

Объем водохранилища сезонного регулирования определяется путем сопоставления расчетного стока и потребления.

Сезонное регулирование - наиболее распространенный вид регулирования стока; применяется при водоснабжении, в энергетике, орошении и других отраслях народного хозяйства.

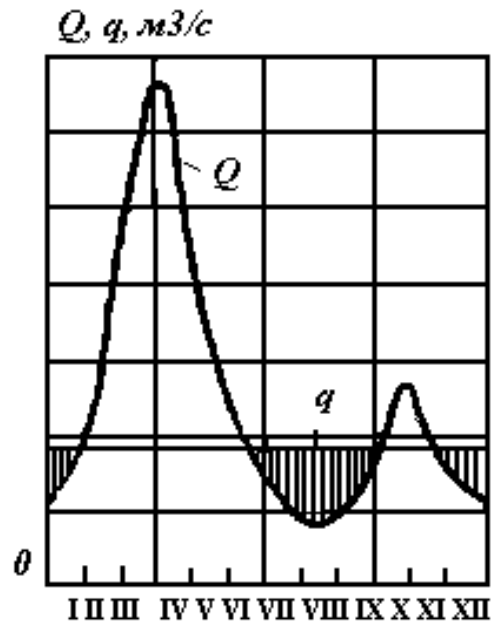


Рисунок 1.3 - Сезонное (годовое) регулирование стока.

*Многолетнее регулирование стока* заключается в перераспределении стока в течение длительного многолетнего периода (рис. 4). Цикл регулирования (наполнение и сработка водохранилища) длится несколько лет. Дефицит в воде за маловодные  $n$ -летия (на рис. 4 - заштрихованная часть) покрывается из запасов воды, накопленных в водохранилище за многоводный период, предшествующий половодью.

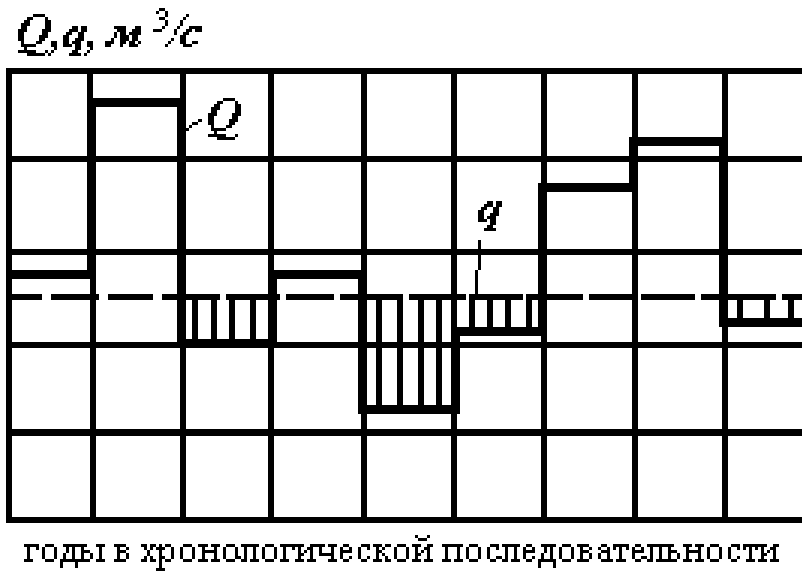


Рисунок 1.4 - Многолетнее регулирование стока

Многолетнее регулирование стока - наиболее полный и совершенный вид регулирования стока, отвечающий задачам комплексного использования водных ресурсов. При этом виде регулирования нужны существенно большие по размерам водохранилища, чем при других видах.

По степени регулирования различают полное и неполное регулирование стока.

При *полном регулировании* используется весь сток и водохранилище работает без сброса, при *неполном* - часть стока не используется и идет на холостой сброс.

При системе нескольких водохранилищ на одном водотоке и его притоках регулирование стока подразделяют на каскадное и компенсирующее.

**Каскадное** регулирование стока имеет место, если водохранилища размещены последовательно в виде ступеней на одной реке.

**Компенсирующее** регулирование обеспечивает покрытие дефицита в воде путем попусков из водохранилища, расположенного на притоке выше водозабора.

## Лекция 2. Водохранилища и их характеристики

1. Значение и классификация водохранилищ
2. Характеристики водохранилища
3. Основные составляющие объема и нормативные уровни водохранилищ

### 1. Значение и классификация водохранилищ

Регулирование стока осуществляется с помощью специальных искусственных водоемов – водохранилищ. *Водохранилище* – искусственно созданный водоем, как правило, с естественными ложем и берегами для накопления и последующего использования запасов воды в целях регулирования стока. Наибольшее распространение получили водохранилища, образованные плотинами, перегораживающими долины рек.

По назначению водохранилища подразделяют на запасные, задерживающие (противопаводочные) и комплексные.

Водохранилища, наполняемые стоком в многоводные периоды для его использования в маловодные периоды, называются *запасными*. Основная задача запасных водохранилищ состоит в повышении расходов воды в маловодные периоды за счет использования запасов воды, созданных путем временного задержания избытков стока в многоводные сезоны или годы. Это наиболее распространенный тип водохранилищ. Они обслуживают энергетику, коммунальное и промышленное водоснабжение, сельское и рыбное хозяйство, речной транспорт и другие отрасли экономики.

*Задерживающие* (противопаводочные) водохранилища предназначены в основном для борьбы с наводнениями и селевыми потоками. За счет временного задержания части стока в периоды многоводья (паводка

или половодья) снижаются максимальные расходы воды, поступающие в нижний бьеф водохранилища, и предотвращается опасность наводнения.

**Комплексное** регулирование стока – это совмещение функций запасного и задерживающего одним водохранилищем.

В зависимости от рельефа местности водохранилища подразделяют на равнинные, предгорные, горные, озерные.

**Водохранилища равнин** характеризуются следующими признаками: большой площадью водной поверхности и протяженностью, небольшой максимальной (15-25 м) и средней (5-9 м) глубинами, небольшой сработкой (2-7 м), интенсивными процессами переработки берегов, сложенных большей частью рыхлыми размываемыми породами. Эти водохранилища, как правило, имеют большую вместимость и используются комплексно. К этому типу водохранилищ можно отнести волжские, часть сибирских и некоторые другие.

**Водохранилища предгорных и плоскогорных областей** характеризуются большой максимальной (до 70-100 м и более) и средней (до 30-35 м) глубиной, значительной сработкой (до 10-20 м), сравнительно небольшой интенсивностью переработки берегов, незначительным затоплением и подтоплением территории.

Для **горных водохранилищ** характерны большие глубины (нередко более 100 м) и сработка (до 50-100 м и более). Затопляемая площадь, подтопление, переработка берегов, фильтрация из водохранилища незначительны. К этому типу относятся большинство водохранилищ Восточной Сибири и Дальнего Востока, некоторые водохранилища Урала и Кавказа.

**Озерные водохранилища** создают путем сооружения плотины на реке, вытекающей из озера, и подпор, вызванный плотиной, распространяется на озеро. Преимущество этих водохранилищ заключается в том, что при незначительном подпоре и небольшой площади затопления земель в них

можно аккумулировать большие объемы воды. К водохранилищам озерного типа относят Иркутское, Верхнесвирское в России, Оуэн-Фолс в Африке и др.

Водоохранилища классифицируют также по площади водной поверхности и объему (табл. 2.1).

Таблица 2.1 - Классификация водохранилищ по размерам

Категория водохранилищ	Полный объем, км <sup>3</sup>	Площадь водной поверхности, км <sup>2</sup>
Крупнейшие	Более 50	Более 5000
Очень крупные	50-10	5000-500
Крупные	10-1	500-100
Средние	1,0-0,1	100-20
Небольшие	0,1-0,01	20-2
Малые	Менее 0,01	Менее 2

В мире уже эксплуатируется более 30 тыс. водохранилищ. Объем воды, аккумулированный в водохранилищах, почти в 5 раз превышает ее запасы в руслах рек и составляет более 12% годового стока рек мира. Площадь же водной поверхности водохранилищ мира превышает площадь Черного моря. Самое крупное водохранилище в мире – Оуэн-Фолс (Виктория) объемом 204,8 км<sup>3</sup> и площадью 76000 км<sup>2</sup>, которое расположено в Африке на стыке трех государств – Танзании, Кении, Уганды.

В России более 2000 водохранилищ с суммарным полным объемом 801,4 км<sup>3</sup>, общей площадью 74,5 тыс. км<sup>2</sup>. Крупные водохранилища построены на реках Волге, Каме, Ангаре, Иртыше, Кубани, Енисее, Амуре и др. Наиболее крупные водохранилища России – Братское (169,3 км<sup>3</sup>, 5500 км<sup>2</sup>), которое является вторым в мире, Красноярское (73 км<sup>3</sup>, 2000 км<sup>2</sup>), (км<sup>3</sup>, 1870 км<sup>2</sup>), Куйбышевское (58,0 км<sup>3</sup>, 6500 км<sup>2</sup>). В табл. 1 приведены основные данные о крупнейших водохранилищах страны.

Таблица 2.2 - Крупнейшие водохранилища России

Водохранилище	Река	Год наполнения	Объем, км <sup>3</sup>		Площадь зеркала при НПУ, тыс. км <sup>2</sup>
			полный	полезный	
Братское	Ангара	1966	169,3	48,2	5,5
Красноярское	Енисей	1970	73	30,4	2,0
Зейское	Зея	1976	68	32	2,4
Усть-Илимское	Ангара	1977	59		1,92
Куйбышевское	Волга	1957	58	34,6	6,45
Бухтарминское	Иртыш	1957	53	31	5,5

Самым крупным водохранилищем Северного Кавказа является Цимлянское, площадь зеркала которого равна 2700 км<sup>2</sup>, полный объем – 23,9 км<sup>3</sup>. Чиркейское водохранилище имеет площадь 42,4 км<sup>2</sup> и объем 2,78 км<sup>3</sup>.

Искусственные водоемы небольших размеров (не более 1 млн м<sup>3</sup>) и площадью водной поверхности менее 1 км<sup>2</sup> называют *прудом*.

## 2. Характеристики водохранилища

К основным характеристикам водохранилища относят зависимость площади водной поверхности  $\Omega$  и объема воды  $V$  в водохранилище от уровня  $H$  (рис. 1.3.1). Кривую  $\Omega = \Omega(H)$  называют кривой площадей водной поверхности водохранилища; кривую  $V = V(H)$  – кривой объемов. Эти кривые наносят на один график и называют **батиграфическими** кривыми.

Исходным материалом для построения кривой площадей водохранилища служат крупномасштабные топографические карты. Площади водной поверхности водохранилища  $\Omega$ , соответствующие различным уровням воды  $H$ , считая поверхность воды горизонтальной, определяют путем планиметрирования площадей, заключенных между отдельными горизонталями и створом плотины, замыкающим горизонтали у берегов.

Кривую  $\Omega=\Omega(H)$  строят в прямоугольных координатах: на оси ординат откладывают уровни  $H$ , на оси абсцисс - площадь  $\Omega$ . Кривая  $\Omega=\Omega(H)$  чаще всего имеет сложный неправильный вид.

Объем воды в водохранилище определяют путем последовательного суммирования частичных объемов  $\Delta V$ , заключенных между смежными горизонталями.

Элементарный объем воды в водохранилище:

$$dV = \Omega dH \quad (2.1)$$

Следовательно, объем воды ( $\text{м}^3$ ), соответствующий уровню воды  $H$ , следующий:

$$V = \int_{H_0}^H \Omega dH \quad (2.2)$$

где  $H_0$  - отметка дна у плотины, м.

При конечном приращении уровня воды  $\Delta H$  объем (млн  $\text{м}^3$ ), заключенный между смежными уровнями, можно рассчитать по упрощенной формуле:

$$\Delta V = (\Omega_i + \Omega_{i+1})\Delta H_{i,i+1}/2, \quad (2.3)$$

где  $\Omega_i$  и  $\Omega_{i+1}$  - площади водной поверхности, соответствующие уровням воды  $H_i$  и  $H_{i+1}$ ,  $\text{км}^2$ ;  $\Delta H_{i,i+1} = H_{i+1} - H_i$  - приращение уровня, м.

Объем первого придонного слоя воды определяют по формуле усеченного параболоида:

$$\Delta V_1 = 2/3 \Omega_1 \Delta H_1 \quad (2.4)$$

Объем воды в водохранилище, соответствующий отметке  $H$ , получают суммированием частных объемов, расположенных ниже этого уровня:

$$V_H = \sum_{H_0}^H \Delta V_i \quad (2.5)$$

По данным вычислений строят кривую объемов  $V = V(H)$ .

Важными характеристиками водохранилища являются также средняя глубина  $h_{cp}$ , м:



$$h_{срi} = V_{Hi} / \Omega_{Hi} \quad (2.6)$$

и критерий литорали (мелководья) -  $L_{\Omega}$ :

$$L_{\Omega} = \Omega_{Li} / \Omega_{Hi} \quad (2.7)$$

где  $\Omega_{Hi}$  и  $V_{Hi}$  - площадь водной поверхности и объем воды в водохранилище при одном и том же уровне  $H_i$ , соответственно  $\text{км}^2$  и  $\text{м}^3$ ;  $\Omega_{Li}$  - площадь литорали (мелководья), соответствующая уровню  $H_i$ ,  $\text{км}^2$ .

Площадь литорали, т.е. площадь водной поверхности прибрежной части водохранилища с глубинами  $h \leq 2$  м, определяют, пользуясь кривой  $\Omega = \Omega(H)$ , как разность площадей водной поверхности водохранилища при уровне воды  $H_i$  и уровне на 2 м ниже:

$$\Omega_{Li} = \Omega_{Hi} - \Omega_{H_i-2} \quad (2.8)$$

Кривые зависимости  $h_{ср} = h_{ср}(H)$  и  $L_{\Omega} = L_{\Omega}(H)$  обычно совмещают на одном графике с батиграфическими характеристиками водохранилища.

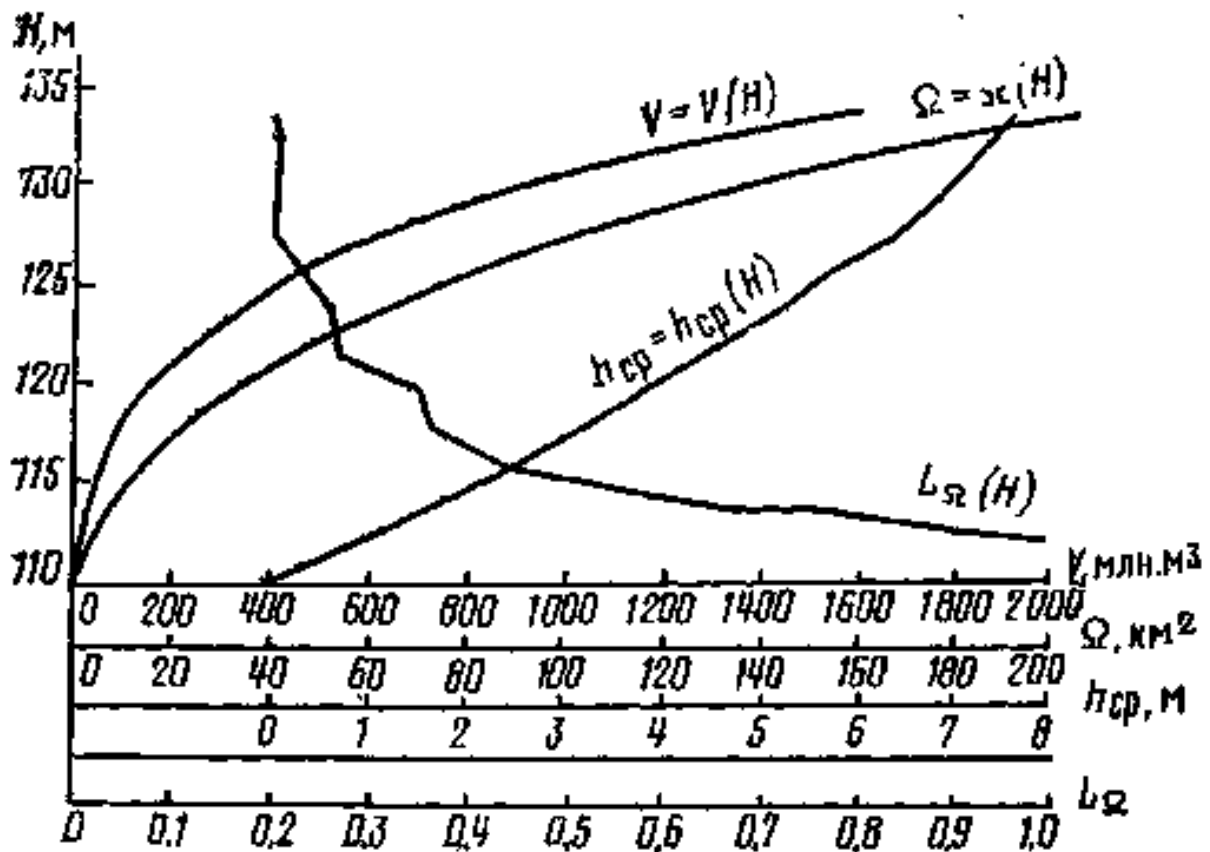


Рисунок 2.1 - Батиграфические кривые

### 3. Основные составляющие объема и нормативные уровни водохранилищ

Размеры водохранилища устанавливают на основе водохозяйственного расчета и определяются нормативными уровнями и объемами.

Различают 3 нормативных уровня: УМО – уровень мертвого объема, НПУ – нормальный подпорный уровень и ФПУ – форсированный подпорный уровень (рис. 2.2).

Уровень поверхности воды, ограничивающий постоянную часть полного объема водохранилища, которая в нормальных условиях эксплуатации не срабатывается и в регулировании стока не участвует, называют **уровнем мертвого объема (УМО)**. Это минимальный уровень водохранилища, до которого возможна его сработка в условиях нормальной эксплуатации. УМО представляет один из важных параметров регулирования, и правильный выбор его отметки имеет большое значение.

**Нормальный подпорный уровень (НПУ)** – наивысший проектный уровень наполнения водохранилища, который может поддерживаться в нормальных условиях эксплуатации гидротехнических сооружений. Выбор отметки НПУ – наиболее ответственная задача проектирования. От правильного назначения отметки НПУ рассчитывают пропускную способность, размеры и прочность гидротехнических сооружений, обеспечивающих работу водохранилища и инженерную защиту объектов, расположенных на его берегах; устанавливают ущерб, наносимый народному хозяйству затоплением, подтоплением и переработкой берегов; оценивают экономические показатели регулирования стока. Окончательно НПУ принимают в результате технико-экономического сопоставления различных вариантов.

Подпорный уровень выше нормального, временно допускаемый в верхнем бьефе в чрезвычайных условиях эксплуатации гидротехнических

сооружений, называют **форсированным подпорным уровнем** (ФПУ). Отметка ФПУ зависит от максимальных расходов воды расчетной обеспеченности, гидрографа половодья (паводка), размеров и типа сбросных сооружений.

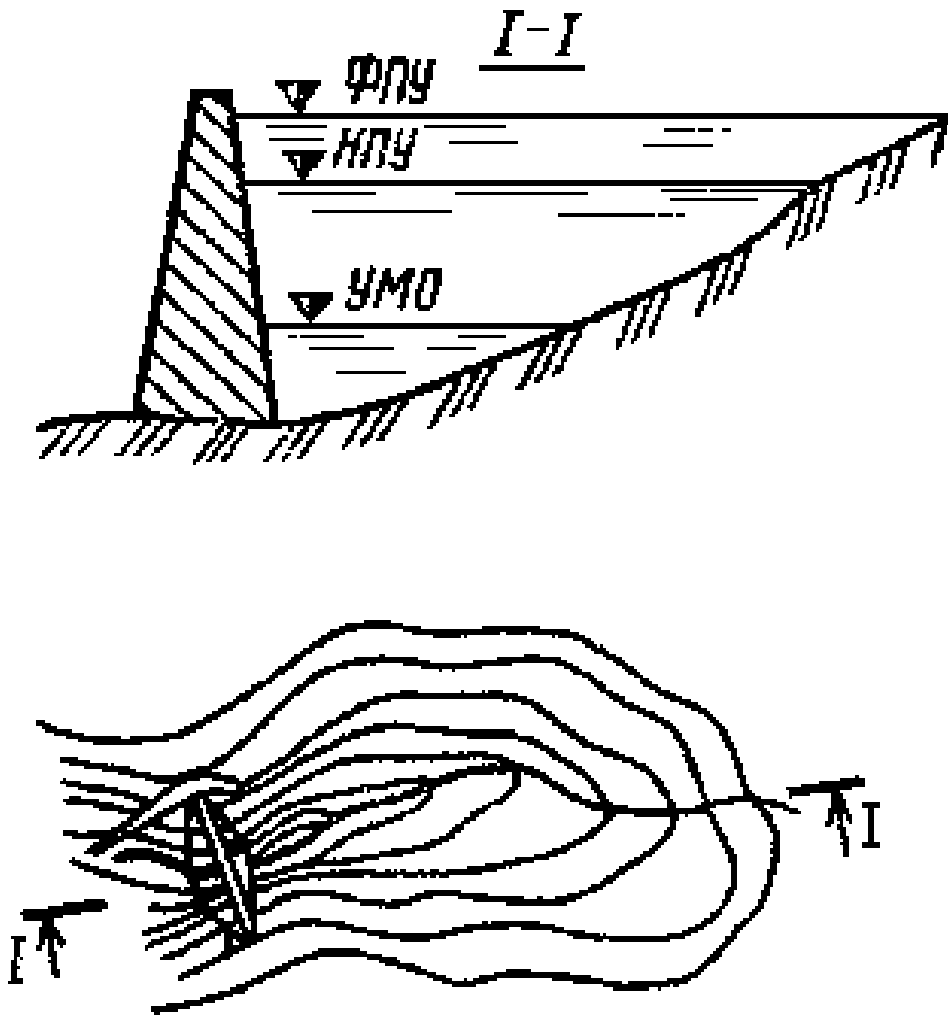


Рисунок 2.2 - План и схематический продольный профиль водохранилища

**Полезный объем водохранилища ( $V_{плз}$ )** - основной объем водохранилища, предназначенный и используемый для регулирования стока. Предельными уровнями водохранилища, ограничивающими полезный объем, являются НПУ и УМО.

Главная задача водохозяйственного расчета водохранилища - определение полезного объема ( $V_{плз}$ ) и выбор отметки НПУ. Полезный объем водохранилища зависит от назначения водохранилища, вида регулирова-

ния стока (суточное, сезонное, многолетнее) и находится путем сопоставления расчетного стока и суммарного водопотребления. Полезный объем имеет определяющее значение при установлении отметки НПУ.

*Мертвый объем ( $V_{MO}$ )* - это постоянная часть полного объема водохранилища, которая в нормальных условиях эксплуатации не срабатывается и в регулировании стока не участвует. Мертвый объем ( $V_{MO}$ ) и соответствующий ему УМО определяют расчетами с учетом ряда условий и соображений (величины заиления, санитарно-технических требований, назначения водохранилища).

Окончательно отметка УМО водохранилища назначается с учетом требований всех водопользователей и водопотребителей.

*Полный объем* водохранилища соответствует отметке НПУ и равен сумме полезного и мертвого объемов:

$$V_{плн} = V_{НПУ} = V_{МО} + V_{плз} \quad (2.9)$$

Между ФПУ и НПУ размещается объем воды, который называют *форсированным, или резервным, объемом ( $V_{\phi}$ )*.

Форсированный объем ( $V_{\phi}$ ) используется для срезки максимальных расходов в период высоких паводков или половодья, чтобы предотвратить наводнения в нижнем бьефе. Поэтому его называют иногда **противопаводковым**.

Отметка ФПУ зависит от максимальных расходов воды расчетной обеспеченности, гидрографа половодья (паводка), размеров и типа сбросных сооружений. Обычно превышение НПУ при форсировке составляет 20-70 см, а на небольших реках - до 2 м. Значение и продолжительность форсировки уровня воды в водохранилище должны быть экономически обоснованы.

### Лекция 3. **Общая методика расчета водохранилищ**

1. Общая методика расчета водохранилищ
2. Расчетная обеспеченность отдачи
3. Основные методы расчетов регулирования стока

#### **1. Общая методика расчета водохранилищ**

Совокупность расчетов по установлению основных параметров водохранилища и режима его работы называют водохозяйственным расчетом.

В состав водохозяйственного расчета входят:

- гидрологические расчеты основных гидрологических характеристик водотока, на котором создается водохранилище;
- установление объемов и режима водопотребления из водохранилища, а также потерь воды, вызванных его сооружением;
- назначение нормативных подпорных уровней и объема водохранилища;
- оценка экономической эффективности и народнохозяйственного значения регулирования стока;
- правила эксплуатации водохранилища, обеспечивающие рациональное использование и охрану водных ресурсов.

Независимо от вида регулирования стока водохранилища его параметры рассчитывают методом водохозяйственного баланса. Сущность расчетов заключается в сопоставлении и уравнивании по интервалам времени приходной и расходной частей за период регулирования. Период перехода от дефицита стока к избытку принимают за начало расчетов. Этот период характеризуется полным опорожнением водохранилища, т.е. объем водохранилища равен мертвому объему.

В качестве критерия надежности снабжения потребителя водой в гидротехнической практике используют расчетную обеспеченность отдачи.

Гидрологические расчеты являются основой водохозяйственных расчетов. Распределение стока в течение расчетного водохозяйственного года устанавливают известными в гидрологии методами. При наличии длительного календарного ряда наблюдений (не менее 15 лет) применяют методы реального года или компоновки. Допускается вести расчет и по характерным по водности годам. При отсутствии и недостаточности (менее 15 лет) гидрометрических наблюдений внутригодовое распределение стока в расчетном водохозяйственном году определяют по методу гидрологической аналогии или по районным схемам и региональным зависимостям.

При гидрологических расчетах в качестве исходной информации используют материалы опорной гидрологической сети, систематизированные в Государственном водном реестре. В случае необходимости проводят дополнительные специальные наблюдения, изыскания и исследования. Расходы, объемы и режимы водопользования и водопотребления определяют на основе данных о проектном составе водопользователей и потребителей и расчетных удельных нормах водопотребления (на единицу продукции, на орошение 1 га земли, на человека и т.д.). Объемы и расходы водопользования и водопотребления, отнесенные к створу водохранилища, называют *полезной*, или *плановой, отдачей*.

Потери воды, вызванные устройством водохранилища, суммируют с плановой (полезной) отдачей. Отдача с учетом потерь воды составляет *полную отдачу* водохранилища. Другие исходные материалы, необходимые для водохозяйственного расчета водохранилища, получают на основе

топографических, гидрогеологических, экологических и других изысканий и исследований.

Основные параметры водохранилища, определяющие его размеры, должны быть экономически и технически обоснованы и соответствовать следующим условиям водного хозяйства и гидротехническим требованиям:

1. Установленное водопотребление должно полностью удовлетворяться с заданной обеспеченностью.

2. Объем водохранилища не должен быть чрезмерным большим, не более 2 объемов годового стока (т.к. длительное заполнение водохранилища приводит к его нерентабельности).

3. Средняя глубина водохранилища в теплых районах при НПУ должна быть не менее 4-5 м (иначе – большие потери на испарение).

## **2. Расчетная обеспеченность отдачи**

Основные параметры водохранилища и режим его работы устанавливаются путем сопоставления и анализа расчетного стока и планового потребления. В качестве критерия надежности снабжения потребителя водой в гидротехнической практике используют расчетную обеспеченность отдачи. Расчетная обеспеченность отдачи – это очень важный критерий, который определяет, не только объем водохранилища и отдачу, но и размеры капитальных вложений в строительство водохранилища и гидроузла в целом, общую экономическую эффективность регулирования стока.

При расчете надежности снабжения потребителей водой пределом расчетной обеспеченности служат расходы воды 75-97% обеспеченности.

Нормативные значения расчетной обеспеченности отдачи устанавливаются на основании опыта, накопленного практикой проектирования. Все

водопотребители по степени бесперебойности в подаче воды делят на 3 группы:

- не допускающие перерыва или уменьшения подачи воды;
- не допускающие перерыва, но разрешающие кратковременное снижение подачи воды (определяемое технологией производства);
- допускающие кратковременный перерыв или уменьшение подачи воды.

К первой группе относят объекты специального назначения, крупные промышленные центры и отдельные предприятия, системы коммунального водоснабжения; расчетную обеспеченность для этой группы принимают 95-97% и более (до 99%).

Во вторую группу входит большинство промышленных предприятий; расчетная обеспеченность в этом случае составляет 95%.

В третью группу включают оросительные системы, гидроэлектростанции, водный транспорт, рыбное хозяйство и другие объекты. Расчетная обеспеченность для этой группы находится в следующих пределах (%): для ГЭС-90, для орошения – 85, для водного транспорта – 80-90, для рыбного хозяйства – 75-85.

Расчетную обеспеченность отдачи ( $p\%$ ) обычно назначают в нормативном порядке применительно к виду потребителя воды и степени допустимости перебоев в ее подаче. Потребление за год при сезонном регулировании стока не должно превосходить объем стока расчетного водохозяйственного года.

### **3. Основные методы расчетов регулирования стока**

Расчет регулирования стока заключается в определении объемов водохранилища и соответствующих им уровней воды.



Методы расчета регулирования стока можно разделить на две группы: *расчеты по календарным стоковым рядам* (балансовые расчеты) и *обобщенные методы*, основанные на использовании математической статистики и теории вероятностей.

Балансовые методы расчета водохранилища выполняются по данным многолетних гидрологических наблюдений.

Расчет непосредственно по стоку истекшего периода (по календарным рядам) отличается наглядностью и удобством применения к любому виду регулирования стока. Его основные недостатки – невозможность использования при отсутствии продолжительных наблюдений за стоком реки и неопределенность в оценке обеспеченности отдачи из водохранилища.

Обобщенные методы основаны на использовании методов математической статистики и теории вероятности. Эти методы позволяют выявить множество возможных сочетаний характеристик стока, полнее использовать информацию, содержащуюся в исходном ряду. К числу недостатков обобщенных методов можно отнести ненаглядность, а также абстрактность водохозяйственных расчетов, при которой за сложными математическими построениями затушевывается роль генетических факторов в формировании закономерностей стока.

В связи с этим при водохозяйственном проектировании целесообразно сочетать элементы обоих методов расчета. Взаимно дополняя друг друга, они позволяют с достаточной полнотой и достоверностью установить необходимые расчетные параметры и проектный режим работы водохранилища.

## Лекция 4. Потери воды и заиление водохранилищ

1. Потери воды из водохранилищ
2. Заиление водохранилищ
3. Переформирование берегов водохранилища

### 1. Потери воды из водохранилищ

При создании водохранилища вследствие затопления и подтопления части территории возникают дополнительные потери воды, основные из которых – потери на испарение и фильтрацию.

Учет потерь воды — важная часть водохозяйственного расчета водохранилища, необходимая для правильного определения объема и составления баланса водных ресурсов при регулировании стока.

**Потери воды на фильтрацию.** Подпор, создаваемый плотиной водохранилища, затопление и подтопление значительной территории приводят к увеличению потерь воды на фильтрацию. Последние состоят из фильтрации через дно и берега водохранилища, а также через тело, основание и в обход плотины.

Потери на фильтрацию через тело, основание и в обход плотины относительно невелики. Их удастся свести к минимуму с помощью различных противофильтрационных устройств (понуров, экранов, диафрагм и т.д.), применяющихся при гидротехническом строительстве.

Потери стока на фильтрацию через дно и берега водохранилища идут в основном на пополнение запасов грунтовых вод и зависят от напора и гидрогеологических условий (пород, слагающих долину реки, их водопроницаемости, характера залегания, положения уровня и режима грунтовых вод).

Наиболее значительная фильтрация из водохранилища наблюдается в первые годы его работы. Это объясняется тем, что в период наполнения и начальной эксплуатации водохранилища идет насыщение водой грунта, образующего его чашу, пополнение запасов подземных вод. С течением времени уровень и режим грунтовых вод стабилизируются и фильтрация уменьшается (в 2-3 раза и более). Период стабилизации наступает через 4-5 лет, а на крупных водохранилищах может составлять от 7 до 15 лет и более.

При предварительных расчетах все виды фильтрационных потерь из водохранилища оценивают по приближенным нормативам в виде слоя воды с водной поверхности водоема или в процентах от среднего объема воды за расчетное время в зависимости от гидрогеологических условий (табл. 4.1)

При одних и тех же гидрогеологических условиях фильтрация зависит от уровня воды в водохранилище и площади его ложа. Очевидно, что чем больше эти характеристики, тем больше будут потери на фильтрацию.

Таблица 4.1 - Норма потерь на фильтрацию из водохранилищ (по Я.Ф. Плешкову)

Гидрогеологические условия	Слой испарения за год, см	% от среднего объема водохранилищ	
		за год	за месяц
Хорошие	0-50	5-10	0,5-1,0
Средние	50-100	10-20	1,0-1,5
Плохие	100-200	20-40	1,5-3,0

Хорошие гидрогеологические условия соответствуют случаю, когда ложе водохранилища сложено водонепроницаемыми породами, а уровень грунтовых вод на участке залегания выше отметок подпорных уровней.

Средние гидрогеологические условия характеризуются маловодопроницаемыми грунтами ложа водохранилища, грунтовые воды находятся выше УМО.

При плохих гидрогеологических условиях чаша водохранилища сложена водопроницаемыми неводоносными породами и имеется отток из водоема на питание грунтовых вод.

**Потери воды на испарение.** После сооружения водохранилища образуется дополнительная площадь, покрытая водой, следовательно, происходят дополнительные потери воды на испарение, так как испарение с поверхности воды значительно выше, чем с поверхности суши. Чем больше площадь зеркала водохранилища, тем выше потери воды на испарение.

Для предварительных расчетов потерь воды на испарение используется зависимость слоя испарения от площади водной поверхности водохранилища в определенный период времени:

$$V_3 = Z_D \Omega_3 / 1000, \quad (4.1)$$

где  $Z_D$  – слой дополнительного испарения с площади затопления (принимается по таблице Указаний по расчету испарений), мм/мес.;  $\Omega_3$  – площадь зеркала водохранилища, км<sup>2</sup>, определяют по батиграфическим кривым водохранилища.

Для северных районов оно мало, и его можно рассчитывать приближенно. Для сухой зоны потери на испарение могут быть значительными, и если их не учитывать, то существенно снижается водоотдача водохранилища.

При водохозяйственных расчетах водохранилищ на стадии проектирования обычно строят графики суммарных потерь воды, которые используют также и при эксплуатации водохранилищ.

**Мероприятия по уменьшению потерь воды.** При проектировании и эксплуатации водохранилищ большое внимание должно уделяться разработке и реализации рациональных мер по уменьшению потерь воды.

Потери на дополнительное испарение можно уменьшить путем посадки по периметру водохранилища лесов, защитных лесополос, сооруже-

ния водохранилищ в глубоких выемках, котловинах с крутыми берегами. Эти мероприятия позволяют снизить скорость ветра и длину разгона воздушного потока и, как результат, уменьшить значение и интенсивность испарения.

Большое количество воды теряется в жаркие периоды года с площади прогреваемых мелководий. Снизить эти потери можно путем обвалования мелководных зон. К мерам по уменьшению потерь на испарение относятся также сработка в летний период поверхностных более теплых слоев воды, увеличение проточности водоема, ликвидация зарослей водной растительности.

Для уменьшения потерь воды на фильтрацию ложе водохранилища покрывают различными водонепроницаемыми одеждами (глинобетоном, битумом, жидким стеклом, полиэтиленовыми пленками), создают слабо-водопроницаемые слои грунта, пропитыванием растворами дубильных веществ, уплотнением, кольматацией. Трещины или карстовые пустоты в породах, образующих чашу водохранилища, заполняют различными инъекционными растворами (цементобentonитовыми, маслoбentonитовыми, глиноцементными и др.). Устранение фильтрации в обход подпорных сооружений и под их основание достигается устройством шпунтовых стенок, цементационных завес, диафрагм и т.д.

## **2. Заиление водохранилищ**

Процесс заполнения водохранилища наносами называют *заилением*. Отложения, сформировавшиеся в водохранилище в процессе его заиления, образуют так называемое *тело заиления*.

Процессы осаждения наносов и формирования тела заиления зависят от целого ряда факторов:

- размеров и конфигурации водохранилища;
- устойчивости его берегов;
- режима стока и гранулометрического состава транспортируемых рекой наносов;
- режима сработки и наполнения водохранилища и др.

В среднем в водохранилищах задерживается около 90-95% донных и взвешенных наносов. С течением времени мертвый объем водохранилища может быть полностью заилен. Откладываясь выше уровня мертвого объема, наносы уменьшают полезный объем, и тем самым нарушается нормальная работа водохранилища.

Водохранилище, потерявшее вследствие заиления 70-80% полезного объема, уже не может нормально выполнять свои функции.

**Расчет срока и объема заиления.** Продолжительность полного заиления водохранилища до отметки НПУ называют сроком заиления. В качестве основной характеристики срока заиления водохранилища принимают показатель условной заиляемости (лет):

$$t_y = V_{НПУ} / G, \quad (4.2)$$

где  $V_{НПУ}$  - объем водохранилища при НПУ, м<sup>3</sup>;  $G$  - среднееголетний объем наносов, отложившихся в водохранилище за год, м<sup>3</sup>.

Показатель условной заиляемости характеризует продолжительность заиления водохранилища до отметки НПУ при условии полного осаждения поступающих в водоем наносов.

В тех случаях, когда показатель условной заиляемости ( $t_y$ ) оказывается менее 200 лет для крупных водохранилищ и менее 50 лет для прудов, выполняют хронологический расчет заиления. Считается, что интенсивность заиления водохранилища затухает во времени по мере уменьшения его емкости.

При расчетах заиления водохранилищ употребляется также термин *срок службы водохранилища*, предложенный М.В. Потаповым. Под сроком службы водохранилища понимают время, в течение которого наносами заполняется мертвый объем:

$$T = V_{MO} / G \quad (4.3)$$

Следовательно, мертвый объем  $V_{MO} = G T$ , где  $T$  - срок службы водохранилища, лет;  $G$  - годовой объем стока наносов, м<sup>3</sup>;  $G = (\rho_m / \gamma) \times W \times 10^6$ ,  $W$  - среднемноголетний сток реки, м<sup>3</sup>/год;  $W = Q \times 31,56 \times 10^6$ , м<sup>3</sup>;  $\gamma$  - объемный вес наносов, т/м<sup>3</sup>,  $\rho_m$  - среднемноголетняя мутность воды, г/м<sup>3</sup>.

Показатели принимают по данным наблюдений, при отсутствии – по картам мутности.

**Мероприятия по уменьшению заиления водохранилищ.** Для предотвращения и уменьшения заиления водохранилищ планируют и осуществляют ряд специальных мероприятий. К числу наиболее радикальных относятся следующие:

- организация рационального природопользования (применение почвозащитных севооборотов, залужение и террасирование крутых склонов, облесение и закрепление оврагов, балок, берегов водохранилища и другие агротехнические, культурно-технические и лесомелиоративные мероприятия);

- сооружение в верховьях рек перед регулирующим водохранилищем одного или нескольких специальных водоемов для борьбы с наносами и снижения размывающей способности потока;

- устройство внеусловых наливных водохранилищ, наполняемых и сбрасываемых через обводные каналы; при этом часть паводочного и половодного стока, транспортирующего большое количество наносов, пропускается транзитом, минуя водохранилище;

- проектирование и строительство плотин и гидроузлов, позволяющих периодически промывать водохранилища путем пропуска больших расходов при паводках или половодье через донные отверстия при максимально опорожненном водохранилище;

- удаление отложившихся наносов с помощью плавучих земснарядов (землесосов, землечерпалок) и других механизмов.

### **3. Переформирование берегов водохранилища**

Заполнение мертвого объема водохранилища наносами может происходить и в результате переформирования берегов водохранилища.

Процессы размыва и обрушения берегов водохранилищ, продолжающиеся до образования устойчивой береговой отмели, называют переработкой берега, или переформированием. В результате переработки крутые берега водохранилища отступают, образуются отмели, значительная часть продуктов размыва выносится в глубоководную часть водохранилища. При проектировании водохранилищ необходимо учитывать возможность и размеры переработки берегов, объемы заиления продуктами размыва, последствия этих процессов для эксплуатации водохранилищ и хозяйственного освоения прибрежной территории.

Переформирование берегов – процесс достаточно длительный, сложный и непрерывно затухающий. На его интенсивность влияют ветровое волнение, изменение уровня воды при сработке и наполнении водохранилища, состав грунтов и гидрогеологические условия прибрежной зоны, режим движения влекомых наносов и др. С течением времени формируется устойчивый профиль береговой отмели, достаточно пологий и широкий, защищающий берег от дальнейшего размыва.



Переформирование берегов идет в направлении спрямления береговой линии с правой и углубления ее в прилегающую местность с левой стороны водохранилища.

Метод, позволяющий прогнозировать наиболее вероятные береговые переформирования, предложен Н.Е. Кондратьевым (рис. 4.1). Метод имеет гидродинамическое обоснование, расчет заключается в определении глубины, на которую распространяется действие волнения, и установлении очертания береговой отмели.

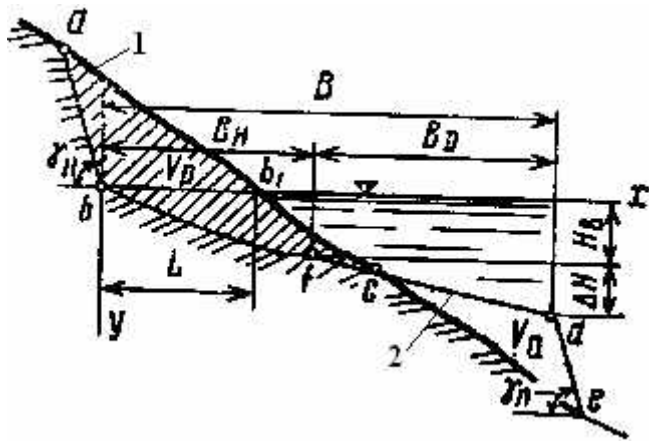


Рисунок 4.1 - Схема переформирования берега водохранилища:

1 - первоначальный профиль береговой линии; 2 - прогнозируемый профиль береговой линии

Глубина размывающего действия волны:

$$H_B = 0,64 \times h_i \times \operatorname{arsh} (8,1 \times h_i), \quad (4.4)$$

где  $h_i$  - расчетная высота волны, м;  $\operatorname{arsh}$  - аресинус, т.е. обратный гиперболический синус от  $8,1h_i$ .

Для приближенных расчетов глубину размывающего действия волны ( $H_B$ ) определяют в зависимости от расчетной высоты волны ( $h_i$ ):

$h_i$ , м	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00
$H_B$ , м	0,68	1,72	3,00	4,35	5,80	7,30	8,85	10,40

За расчетную высоту волны принимают ее наибольшую высоту, которая может наблюдаться в открытой части водохранилища в непосредственной близости от рассматриваемого участка берега.

## Лекция 5. Сезонное (годовое) регулирование стока

1. Необходимость сезонного регулирования
2. Таблично-цифровые балансовые расчеты
3. Графические способы расчета водохранилищ
4. Графики режима работы водохранилища.
5. Графический способ решения обратной задачи регулирования стока

### 1. Необходимость сезонного регулирования

Необходимость сезонного регулирования стока устанавливают сопоставлением расчетного стока ( $W$ ) и плановой отдачи ( $U$ ) по расчетным интервалам времени. Обычно в качестве расчетного интервала в период половодья берут декаду, в межень – месяц. Если в течение расчетного водохозяйственного периода выявляются моменты, в течение которых плановая отдача с учетом потерь превышает расчетный сток, регулирование стока необходимо.

При регулировании стока возможно полное и неполное использование стока. При полном использовании стока приходная и расходная части водохозяйственного баланса равны, сбросы не производят. Полезную емкость водохранилища ( $V_{плз}$ ) определяют по суммарным объемам дефицита.

При неполном использовании объем стока превышает объем дефицита. Полезная емкость водохранилища назначается по суммарному объему дефицита. Превышение объема воды над суммарным объемом отдачи за период регулирования идет на сброс.

В зависимости от величины, последовательности и соотношения периодов избытков и дефицитов возможны следующие режимы работы водохранилища: одноктактный, двухтактный и многотактный (рис. 5.1).

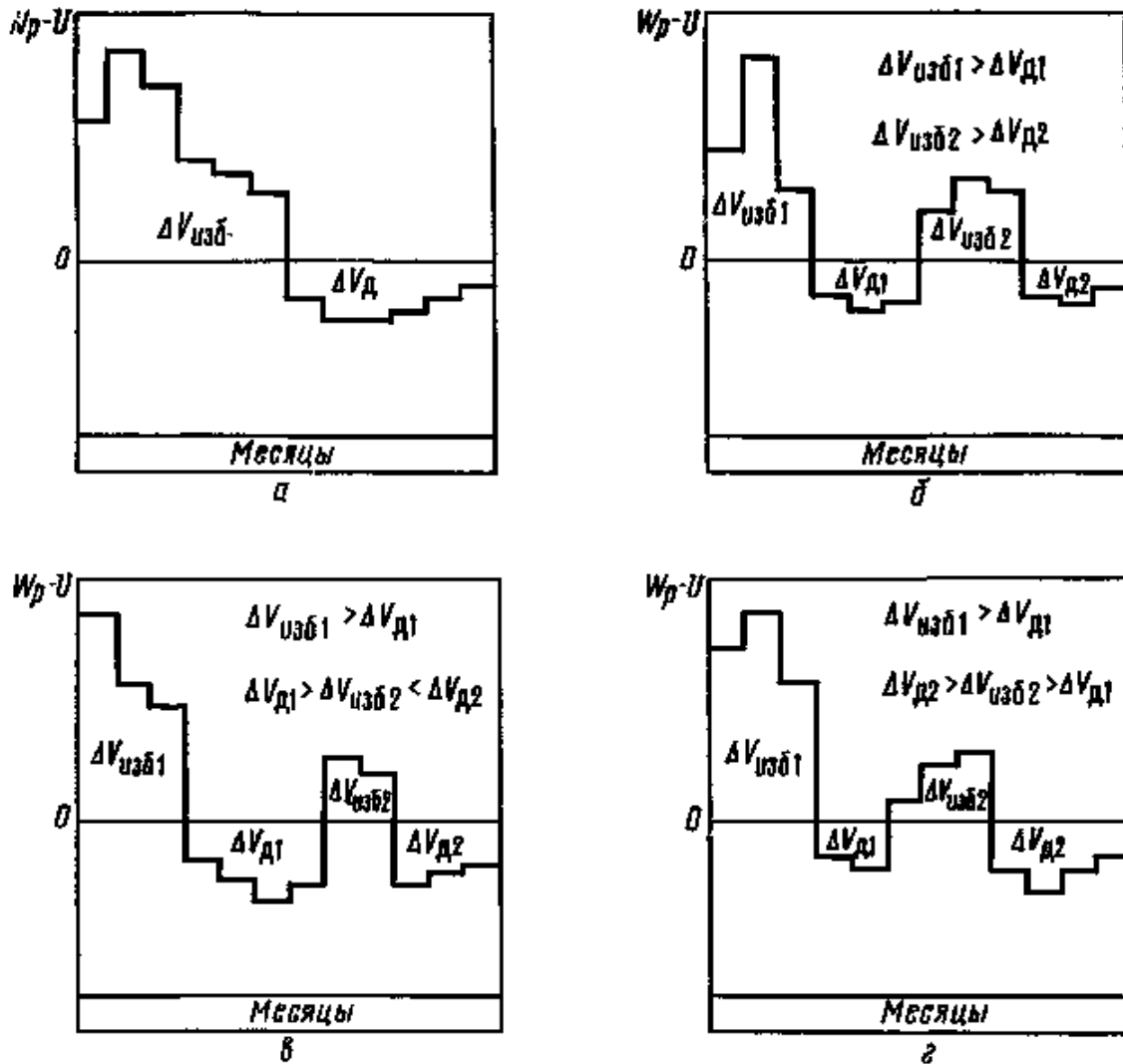


Рисунок 5.1 - Совмещенные графики притока и отдачи из водохранилища

**Однотактный режим** характеризуется наличием одной балансовой группы избытков  $\Delta V$  и одной группы дефицитов  $\Delta d$  (рис. 5.1а). В этом случае, если объем избытков  $\Delta V$  превышает объем дефицита  $\Delta d$ , необходимый полезный объем водохранилища:

$$V_{плз} = \Delta d \quad (5.1)$$

Очевидно, что к моменту времени, соответствующему началу дефицита, водохранилище должно быть наполнено до отметки НПУ, а его полный объем  $V_{НПУ} = V_{МО} + V_{плз}$ . В конце дефицита полезный объем будет полностью сработан, и в водохранилище останется только не подлежащий сработке мертвый объем ( $V_{МО}$ ).

**Двухтактный режим** работы водохранилища характеризуется наличием в течение расчетного периода двух групп избытков и недостатков. При этом возможны следующие случаи двухтактной работы: с независимым циклом (рис. 5.1б); с зависимым циклом (рис. 5.1в) и с промежуточно-зависимым циклом (рис. 5.1г).

При двухтактной работе с *независимым циклом* (рис. 5.1б) каждый из избытков больше следующего за ним дефицита, то есть  $\Delta V_1 > \Delta d_1$  и  $\Delta V_2 > \Delta d_2$ , и расчетный период регулирования делится на 2 независящих друг от друга цикла.

Полезный объем водохранилища в этом случае равен большему из дефицитов:

$$V_{\text{плз}} = \Delta d_{\text{max}} \quad (5.2)$$

К моменту наступления большего дефицита водохранилище должно быть наполнено до  $V_{\text{НПУ}}$ , к концу этого дефицита сработано до  $V_{\text{МО}}$ .

При двухтактной работе с *зависимым циклом* (рис. 5.1б)  $\Delta V_1 > \Delta d_1$ , а  $\Delta d_1 > \Delta V_2 < \Delta d_2$ , т.е. для покрытия второго дефицита  $\Delta d_2$  недостаточно предшествующего ему избытка  $\Delta V_2$  и необходимый объем запасают из первого наибольшего избытка  $\Delta V_1$ . В этом случае

$$V_{\text{плз}} = \Delta d_1 + \Delta d_2 - \Delta V_2 \quad (5.3)$$

Водохранилище должно быть наполнено до  $V_{\text{НПУ}}$  к началу первого дефицита, а срабатывается до  $V_{\text{МО}}$  к концу второго.

Двухтактный режим с *промежуточно-зависимым циклом* имеет место, когда  $\Delta V_1 > \Delta d_1$ , а  $\Delta d_2 > \Delta V_2 > \Delta d_1$ , т.е. второй избыток  $\Delta V_2$  превышает предшествующий ему дефицит  $\Delta d_1$ , но меньше последующего  $\Delta d_2$ . При этих условиях полезный объем принимают равным максимальному дефициту:

$$V_{\text{плз}} = \Delta d_{\text{max}} \quad (5.4)$$

Наполнение водохранилища до  $V_{нпу}$  должно быть завершено к началу максимального дефицита, а опорожнение до  $V_{МО}$  - к его окончанию.

Аналогично изложенному выполняется расчет полезного объема водохранилища и в случае многотактного режима его работы.

При регулировании стока различают прямую и обратную задачи. В **прямой задаче** путем сопоставления расчетного стока и плановой отдачи определяют полезный объем водохранилища, а также режим его работы в зависимости от заданных условий регулирования. Требования водопользователей на воду удовлетворяются полностью. При неполном использовании стока устанавливают порядок проведения сбросов излишков воды.

В **обратной задаче** вычисляют фактическую отдачу при известном стоке реки и заданном условиями проектирования полезном объеме водохранилища.

Как в прямой, так и в обратной задачах обеспеченность отдачи принимается равной обеспеченности стока.

## 2. Таблично-цифровые балансовые расчеты

Таблично-цифровые балансовые расчеты водохранилищ широко распространены в практике проектирования. Их достоинства: простота, возможность проверок и применения ЭВМ.

Полезный объем водохранилища, а также режим его работы (наполнение, сбросы и т.д.) определяют путем последовательного сопоставления по интервалам времени стока расчетного водохозяйственного периода и плановой отдачи. Основной метод – расчет по календарным гидрологическим рядам.

Расчеты регулирования стока по фактическим календарным годам заключаются в последовательном составлении баланса воды для каждого

из элементарных отрезков времени, на которые разделяется рассматриваемый период. При этом уравнение баланса имеет вид

$$\Delta V = W - U - V_n - Q_{сб}, \quad (5.5)$$

где  $\Delta V$  – изменение объема водохранилища за время  $\Delta t$ , м<sup>3</sup>;  $W$  – расчетный сток (приток к водохранилищу), м<sup>3</sup>/с;  $U$  – расход отдачи, м<sup>3</sup>/с;  $V_n$  – объем потерь воды из водохранилища, м<sup>3</sup>;  $Q_{сб}$  – сбросный расход, м<sup>3</sup>/с.

Порядок наполнения водохранилища и сбросов излишков воды определяется правилами регулирования. Применяют различные варианты регулирования. Рассмотрим два из них.

По *первому варианту* водохранилище наполняют до  $V_{НПУ}$  за счет первых избытков и только после этого осуществляют сброс излишков воды через водосбросные сооружения.

При регулировании по *второму варианту* вначале при уровне мертвого объема сбрасывают излишки воды, а затем водохранилище наполняют до НПУ.

Первый вариант более надежный, в нем используются все возможности для скорейшего заполнения водохранилища. Однако этот вариант имеет и недостатки: удлиняется период затопления и подтопления территории, увеличиваются потери воды на испарение и фильтрацию, ускоряется процесс заиления водохранилища, затрудняется проведение гидравлических промывок.

Второй вариант не имеет недостатков первого и поэтому предпочтителен, особенно при эксплуатации водохранилищ, на водотоках, несущих большое количество наносов. Однако для регулирования по этому варианту необходимы донные водосбросные сооружения большой пропускной способности, обеспечивающие сброс в нижний бьеф больших расходов без значительного подъема уровня воды в водохранилище. При этом должна быть исключена возможность наводнения в нижнем бьефе.

**Расчет по первому варианту правил регулирования стока.** За начало расчета принимают момент, когда водохранилище опорожнено до УМО (т.е. период окончания максимальных дефицитов). В хронологической последовательности вычисляют объем наполнений водохранилища и сбросов на конец расчетного интервала времени (декады, месяца и т.д.).

При этом используют уравнение баланса воды (5.5), которое при условии, что потери воды не учитываются, можно представить в виде

$$V_{ki} = V_{ni} + (W - U)_i - V_{c\bar{o}i}, \quad (5.6)$$

где  $V_{ni}$  и  $V_{ki}$  - объем воды в водохранилище (наполнение) соответственно на начало и конец соответствующего расчетного интервала времени  $\Delta t$ , м<sup>3</sup>;  $(W - U)$  - объем избытков или дефицита за время  $\Delta t$ , м<sup>3</sup>;  $V_{c\bar{o}i}$  - объем сброса воды за  $\Delta t$ , м<sup>3</sup>.

Наполнения водохранилища ограничены, с одной стороны,  $V_{НПУ}$ , а с другой -  $V_{МО}$ . Поэтому должно выполняться условие  $V_{НПУ} \geq V_{ki} \geq V_{МО}$ . Подставляя значение  $V_{МО}$  (принимаемое за  $V_n$ ) в формулу, находят наполнение на конец месяца. При этом если оказывается, что  $V_i > V_{НПУ}$ , определяется величина сброса, т.к. объем воды в водохранилище не может превышать  $V_{НПУ}$ .

Объем сброса определяется из уравнения (5.6):  $V_{c\bar{o}i} = V_i - V_{НПУ}$ .

Для каждого последующего расчетного интервала времени за начальное наполнение принимают наполнение в конце предшествующего интервала:  $V_{n2} = V_{k1}$ ;  $V_{n3} = V_{k2}$  и т.д. Расчет выполняют последовательно, в хронологическом порядке. В конце расчетного периода  $V_{kn} = V_{МО}$ .

**Расчет по второму варианту правил регулирования стока.** В этом случае в порядке, обратном ходу времени, с момента  $V_{kn} = V_{МО}$  последовательно вычисляют объемы наполнений и сбросов на начало каждого интервала времени по зависимости:

$$V_{ni} = V_{ki} - (W - U)_I + V_{c\bar{o}i} \quad (5.7)$$

Кроме того, сохраняет силу ограничение:  $V_{НПУ} \geq V_{ki} \geq V_{МО}$ .

В начале расчета  $V_{kn} = V_{МО}$ ; в конце предшествующего интервала принимают  $V_{k_{n-1}} = V_{Hn}$ ;  $V_{k_{n-2}} = V_{k_{n-1}}$  и т.д.

При этом, если оказывается, что  $V_{ki} < V_{НПУ}$ , определяется величина сброса  $V_{сбi}$ , т.к. объем воды в водохранилище не может быть меньше  $V_{МО}$ .

Объем сброса определяют из уравнения 5.7:  $V_{сбi} = V_n - V_k + (W - U)$ .

Расчет заканчивается при  $V_{n1} = V_{МО}$ .

Пример расчета водохранилища без учета потерь по первому и второму варианту правил регулирования приведен в таблице 5.1 (гр. 1-9).

Из таблицы следует, что суммарная величина сброса излишков одинакова, но осуществляются сбросы в различном режиме.

Следует обратить внимание, что за начало расчета по обоим вариантам регулирования принят август - период перехода максимальных дефицитов к избытку, т.е. водохранилище в этот период полностью опустошено до мертвого объема.

Далее приступают к определению полезного объема водохранилища с учетом потерь. Учет потерь воды - важная часть водохозяйственного расчета водохранилища, необходимая для правильного определения объема и составления баланса водных ресурсов при регулировании стока.

Потери воды из водохранилища на испарение и фильтрацию вычисляют в зависимости от объема водохранилища и площади его зеркала за расчетный интервал времени  $\Delta t$ . При этом средний объем воды в водохранилище за расчетный интервал находят как полусумму начального и конечного наполнений по принятому варианту регулирования без учета потерь:

$$V_{cp} = 0,5 (V_{ni} + V_{ki}) \quad (5.8)$$

Среднюю площадь водной поверхности  $\Omega_{cp}$  определяют по батиграфическим кривым  $\Omega = \Omega(V)$  в зависимости от среднего объема  $V_{cp}$ .



Потери воды приплюсовывают к плановой отдаче, получая полную отдачу (отдачу брутто) за соответствующий интервал времени:  $U_{\text{бpi}} = U_i + V_{ni}$ .

Очевидно, что полезный объем водохранилища, вычисленный с учетом потерь воды, больше, чем без их учета (табл. 5.1).

**Решение обратной задачи.** При заданных условиях проектирования – расчетном притоке  $W_p$ , плановой отдаче  $U$ , норме потерь  $V_n$ , а также известном полезном объеме  $V_{\text{плз}}$  – находят фактическую отдачу  $U_\phi$ , сбросы  $V_{\text{сб}}$  и дефициты отдачи  $\Delta d$ .

Расчет выполняют так называемым цепным способом, используя уравнение водного баланса (5.5), которое в данном случае можно записать следующим образом:

$$U_{\phi i} = (V_{ni} - V_{ki}) + W_i - V_{ni} - V_{\text{сб}} \quad (5.9)$$

Выбирают расчетный интервал времени  $\Delta t$  (сутки, декада, месяц). За начальное наполнение обычно принимают  $V_{n1} = V_{MO}$ . Для первого интервала времени вычисляют все основные параметры регулирования стока, учитывая потери воды из водохранилища: конечное наполнение  $V_{k1}$ , сброс  $V_{\text{сб}}$ , фиктивное наполнение  $V_\phi$  с учетом потерь, т.е. наполнение, не ограниченное объемом водохранилища. Формула имеет следующий вид:

$$V_\phi = V_n + W_p - U - V_n \quad (5.10)$$

Конечное наполнение водохранилища ограничено полным и мертвым объемами:  $V_{\text{НПУ}} \geq V_k \geq V_{MO}$ ; объем потерь  $V_n$  определяется по графику потерь в зависимости от  $V_{\text{ср}} = 0,5 (V_n + V_k)$ .

Если оказывается, что  $V_\phi \geq V_{\text{НПУ}}$ , принимают конечное наполнение с учетом потерь  $V_k = V_{\text{НПУ}}$ . В этом случае сброс излишков воды в нижний бьеф  $V_{\text{сб}} = V_\phi - V_{\text{НПУ}}$ , дефицит отдачи  $\Delta d = 0$ , а фактическая отдача (Щ) равна плановой ( $U$ ).

Если  $V_{\text{НПУ}} \geq V_\phi > V_{MO}$ , то  $V_k = V_\phi$ , сбросы и дефициты отсутствуют, отдача также равна плановой.

Таблица 5.1 - Расчет водохранилища сезонного регулирования, в млн. м<sup>3</sup>  
 $(V_{MO} = 120 \text{ млн. м}^3; V_{нлз} = 98 \text{ млн. м}^3; V_{HIIY} = 218 \text{ млн. м}^3;$   
 $V'_{нлз} = 111 \text{ млн. м}^3; V'_{HIIY} = 231 \text{ млн. м}^3)$

Месяц	$W_p$	$U$	Наполнение без учета потерь						Расчет потерь			Наполнение с учетом потерь					
			сток минус отдача		первый вариант		второй вариант		$V_{ф}$	$\Omega_{ф}, \text{ км}^2$	$V_n$	сток минус отдача и потери		первый и второй варианты			
			+	-	$V_k$	$V_{сб}$	$V_k$	$V_{сб}$				+	-	$V_k$	$V_{сб}$		
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
1	2	3															
04	263	61	202		120	104		202	120	35	3	64	199		120	199	
05	171	61	$\frac{110}{V_1=312}$		120	110		59	146	39	5	66	$\frac{105}{V_1=304}$		120	18	
06	53	61	8		218				167	41	6	67	14		207		
07	39	61	22		210				152	40	6	67	28		193		
08	47	61	$\frac{14}{d_1=44}$		188				134	36	5	66	$\frac{19}{d_1=61}$		165		
09	100	61	39		174				146	39	3	64	36		146		
10	105	53	$\frac{52}{V_2=91}$		213				192	45	3	56	$\frac{49}{V_2=85}$		182		
11	39	53	14		218	47			211	48	3	56	17		231		
12	39	53	14		204				197	46	3	56	17		214		
01	26	53	27		190				186	43	3	56	30		197		
02	26	53	27		163				150	40	2	55	29		167		
03	37	53	$\frac{16}{d_2=98}$		136				128	36	2	55	$\frac{18}{d_2=111}$		138		
					120										120		

Если же  $V_\phi < V_{MO}$  или  $V_\phi < 0$ , то принимают  $V_\kappa = V_{MO}$ . В этих условиях возникают дефициты отдачи  $\Delta d = V_{MO} - V_\phi$ , а фактическая отдача  $U_\phi = U - \Delta d$  – меньше плановой. При отрицательных значениях  $V_\phi$ , дефицит отдачи равен сумме объемов  $V_{MO}$  и  $V_\phi$ :

$$\Delta d = V_{MO} + V_\phi.$$

Наполнение водохранилища в конце первого расчетного интервала времени  $V_{\kappa 1}$  принимают в качестве начального для второго интервала, т.е.  $V_{\kappa 2} = V_{\kappa 1}$ ; для третьего интервала  $V_{\kappa 3} = V_{\kappa 2}$  и т.д. Таким образом, в хронологической последовательности по интервалам времени находят конечные наполнения, сбросы и фактические отдачи за весь период регулирования стока.

Для большей наглядности эти расчеты иллюстрируются графиками, характеризующими наполнения, сработку, сбросы и другие результаты регулирования стока в хронологической последовательности. Надежность и обоснованность балансовых расчетов по календарным рядам можно значительно повысить, сочетая их с расчетами по обобщенным характеристикам с использованием математической статистики и теории вероятностей.

### **3. Графические способы расчета водохранилищ**

При расчетах водохранилищ по календарным рядам гидрометрических наблюдений применяют также графические способы. Они отличаются наглядностью, позволяют лучше понять сущность и процесс регулирования стока. Их используют в основном для предварительных и вспомогательных расчетов, а также для анализа особо сложных случаев регулирования стока.

В графических способах расчетов водохранилищ применяют интегральные (суммарные) кривые – изображение в хронологической последовательности нарастания объемов стока, потребления или их разности.

Полные интегральные кривые используют в основном при расчетах без учета потерь воды, так как учесть потери графически сложно, и снижается точность вычислений.

Для построения полной интегральной кривой стока используют гидрограф стока (рис. 5.2.а). Площадь элементарной полоски гидрографа с основанием  $dt$  и высотой  $Q$  дает элементарный объем  $dW = Qdt$ .

Объем стока за время  $t$  имеет вид:

$$W(t) = \int_0^t Q dt \quad (5.11)$$

Последовательно вычисляя стоки  $W_i$  соответственно за интервал времени  $\Delta t_i$  и откладывая их в масштабе в прямоугольной системе координат (рис. 5.2.б), получаем кривую, характеризующую изменение суммарного стока за рассматриваемый период. Эта кривая носит название **полной интегральной кривой стока**.

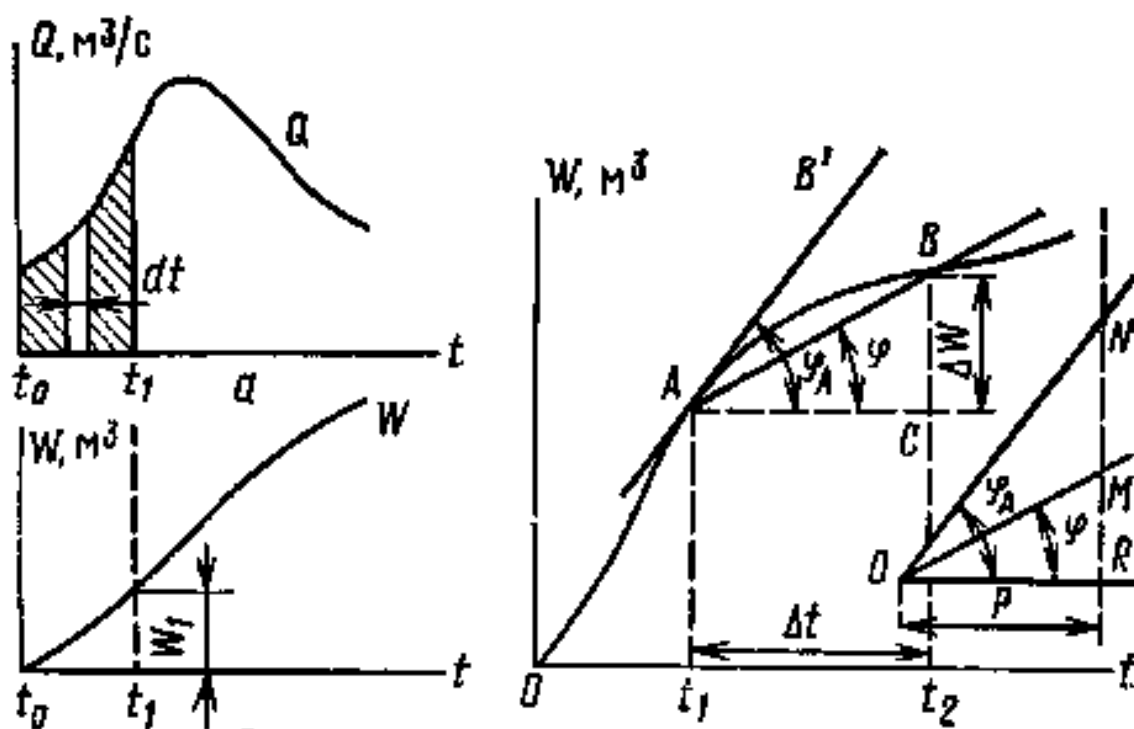


Рисунок 5.2. Гидрограф стока (а) и полная интегральная кривая (б, в)

Рассмотрим основные свойства полной интегральной кривой (рис. 5.2.в):

- если  $Q = \text{const}$ , то суммарная интегральная кривая представлена прямой линией;
- ордината кривой представляет суммарный сток за период от начала водохозяйственного года (начало координат) до рассматриваемого момента времени;
- разность ординат двух точек кривой равна объему стока за интервал времени между ними  $\Delta t$ ;
- тангенс угла наклона  $\varphi$  к оси абсцисс линии, проходящей через две точки кривой А и В (секущей), характеризует средний расход  $Q_{AB}$  в интервале времени  $\Delta t$  между этими точками:  $\text{tg}\varphi = BC/AC = \Delta W/\Delta t = Q_{AB}$ , а тангенс угла  $\varphi_A$  наклона к оси абсцисс касательной АВ' определяет расход  $Q_A$  в точке касания:  $\text{tg}\varphi_A = dW/dt = Q_A$ .

Полную интегральную (суммарную) кривую можно построить на основе предварительно составленной таблицы или с помощью лучевого масштаба.

*Лучевой масштаб* - это вспомогательный график, на котором наклон лучей соответствует определенным расходам воды  $Q$ .

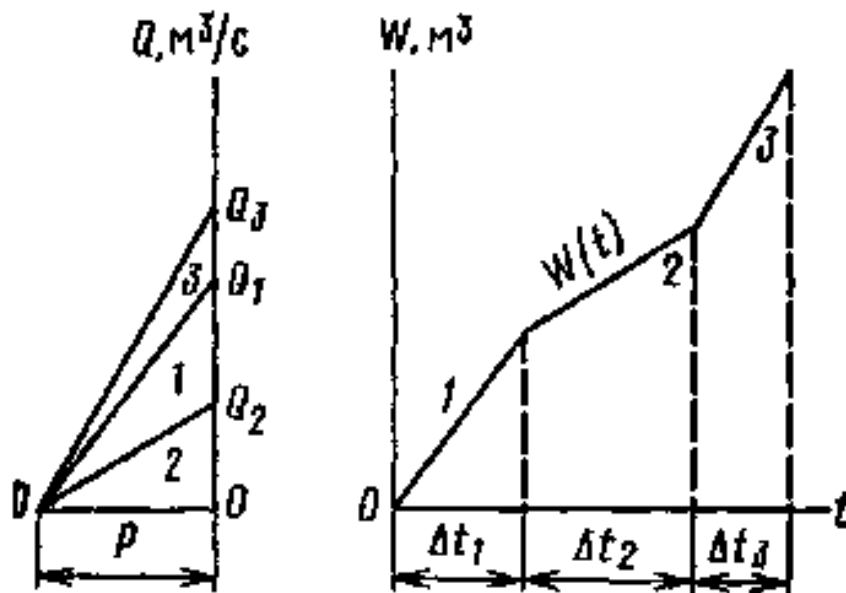


Рисунок 5.3 - Построение суммарной кривой с помощью лучевого масштаба

Лучевой масштаб позволяет по ступенчатому хронологическому графику расходов построить полную суммарную кривую, не прибегая к вычислению и суммированию объемов. Выбрав удобные для использования масштабы  $m_w$ ,  $m_Q$  и  $m_b$ , находят полюсное расстояние  $P$ :

$$P = m_Q / m_t \quad (5.12)$$

На шкале расходов откладывают все расходы  $Q$ , рассматриваемого расчетного периода (рис. 5.3). Затем из полюса лучевого масштаба проводят лучи, соответствующие средним за каждый интервал времени расходам. Полную суммарную кривую строят с первого расчетного интервала, проводя отрезки, параллельные лучу, соответствующему расходу  $Q$  за интервал времени  $\Delta t_i$ , (рис. 5.3). Полученная ломаная линия и будет полной суммарной кривой стока.

При водохозяйственном расчете водохранилища на одном чертеже совмещают полную интегральную кривую стока  $W(t)$  и полную интегральную кривую отдачи  $U(t)$ . Кривые строят в одном масштабе, начиная с момента, соответствующего опорожнению водохранилища до мертвого объема  $V_{MO}$ .

Сопоставляя интегральные кривые стока и отдачи (потребления), находят избытки, дефициты, полезный объем и другие показатели регулирования стока.

Рассмотрим однократную работу водохранилища при постоянной отдаче в течение всего периода регулирования (рис. 5.4).

Сопоставление интегральных кривых стока  $W(t)$  и отдачи  $U(t)$  позволяет установить определенные закономерности.

1. Суммарный объем стока  $W$  за расчетный период превышает суммарное потребление  $U$  за этот же период ( $DF > EF$ ). Разность конечных ординат кривых стока и отдачи равна суммарному сбросу  $V_{сб}$ .

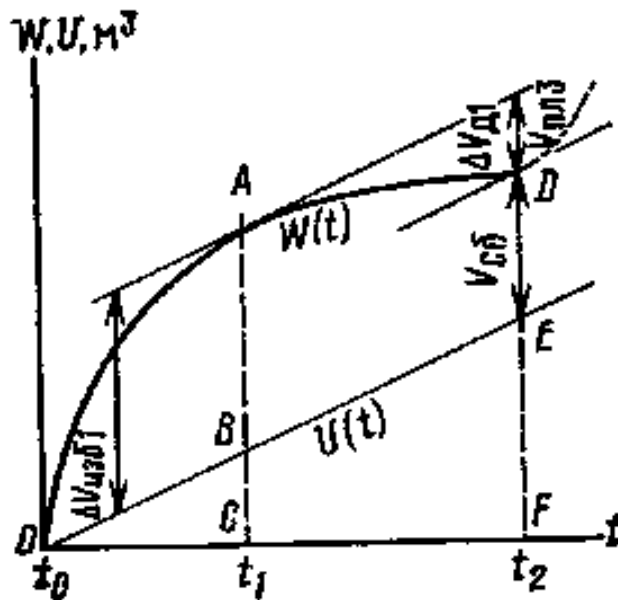


Рисунок 5.4 - Графическое определение полезного объема водохранилища при однократном режиме работы

2. В начальный период регулирования от момента времени  $t_0$  до  $t_1$  наклон к оси абсцисс кривой стока  $W(t)$  больше, чем наклон кривой отдачи  $U(t)$ , следовательно, согласно свойствам интегральных кривых сток  $Q$  превышает отдачу  $q$ . Проведя верхнюю касательную к кривой стока, параллельную кривой отдачи  $U(t)$ , находим момент  $t_1$  окончания избыточного стока и перехода к периоду дефицита. Суммарный избыток за время от  $t_0$  до  $t_1$  равен разности ординат кривых стока и отдачи, соответствующих точке верхнего касания, то есть  $\Delta V_{\text{изб1}} = AC - BC$ .

3. С момента  $t_1$  (точка верхнего касания A) до конца расчетного периода  $t_2$  наклон кривой  $W(t)$  меньше наклона кривой  $U(t)$ ; очевидно, в течение этого периода расход притока  $Q$  меньше расхода отдачи  $q$ , и имеет место дефицит. Нижняя касательная, проведенная к кривой стока параллельно кривой отдачи, определит окончание дефицита (точка D), а вертикальное расстояние между предыдущей верхней и последующей нижней касательной - это суммарный объем дефицита  $\Delta d$  за период от  $t_1$  до  $t_2$  и будет соответствовать объему водохранилища, необходимому для регулирования стока, т.е. полезному объему  $V_{\text{плз}}$ .

Следовательно, при однократной работе водохранилища полезный объем  $V_{плз}$  равен вертикальному расстоянию между касательными, проведенными параллельно интегральной кривой потребления в начале дефицита (верхняя касательная) и в конце его (нижняя касательная).

Аналогично выполняется расчет водохранилища с помощью интегральных кривых и при двухтактной работе (рис. 5.5). Проводят верхние и нижние касательные к кривой стока  $W(t)$ , параллельные кривой отдачи  $U(t)$ , и находят избытки  $\Delta V_1, \Delta V_2$  и дефициты  $\Delta d_1, \Delta d_2$ . Необходимый полезный объем  $V_{плз}$  определяют как наибольшее вертикальное расстояние между предыдущими верхними и последующими нижними касательными, проведенными к кривой стока  $W(t)$  параллельно кривой отдачи  $U(t)$ . При этом верхняя касательная не должна пересекать кривую стока до точки нижнего касания.

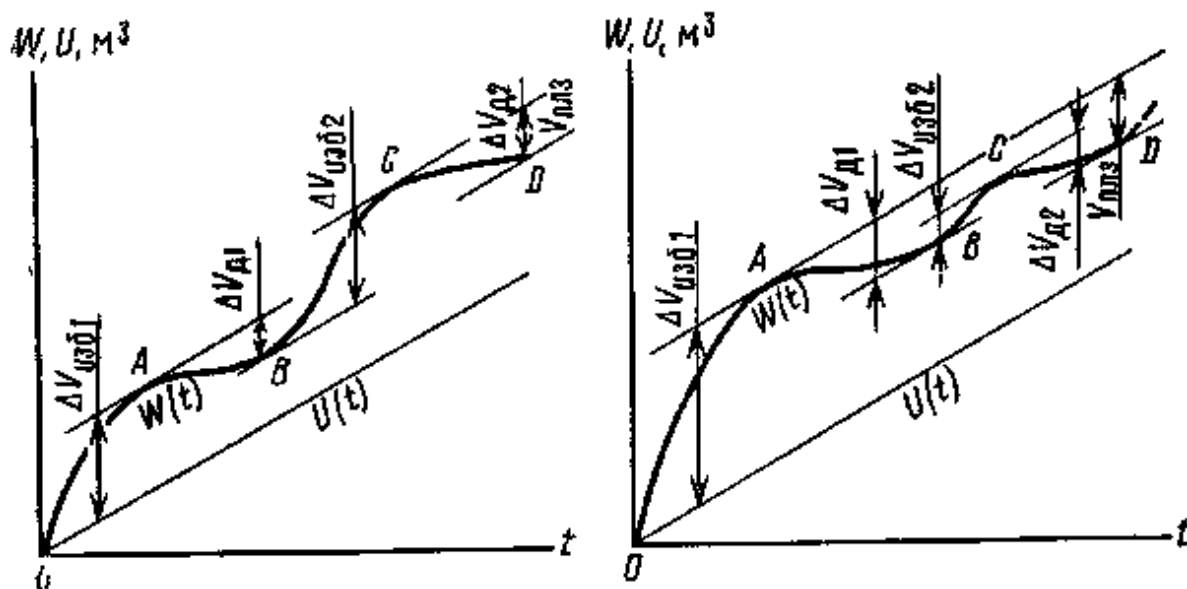


Рисунок 5.5 - Графическое определение полезного объема водохранилища при двухтактной работе с независимым (а) и зависимым (б) циклами

Режим работы водохранилища удобно изображать графически. Графики работы водохранилища (наполнения и сбросы) при регулировании по первому и второму вариантам правил регулирования представлены на рисунке 5.6.



Для построения графика работы водохранилища по первому варианту регулирования (рис. 5.6.а) на оси ординат откладывают отрезок  $OK$  равный полезному объему  $V_{плз}$  и проводят линию  $KR$ , параллельную кривой отдачи  $U(t)$ . Точка  $M$  пересечения этой линии с кривой стока  $W(t)$  определит момент  $t_1$  окончания наполнения водохранилища до необходимого полезного объема (отрезок  $MN = V_{плз}$ ). Поскольку водохранилище полностью наполнено, в нем сохраняется полезный объем ( $RB = MN = OK = V_{плз}$ ) в период от  $t_1$  до  $t_2$ , а излишки воды сбрасываются в нижний бьеф. Суммарный объем сброса определяется отрезком  $AR$ . С момента  $t_2$  начинается период дефицита, а следовательно, и сработки водохранилища. Отложив от точки верхнего касания вниз отрезок  $AL = V_{плз}$  и проведя линию  $LD$ , параллельную кривой отдачи  $U(t)$ , получим необходимые объемы наполнений водохранилища в период дефицита на участке от  $t_2$  до  $t_3$ .

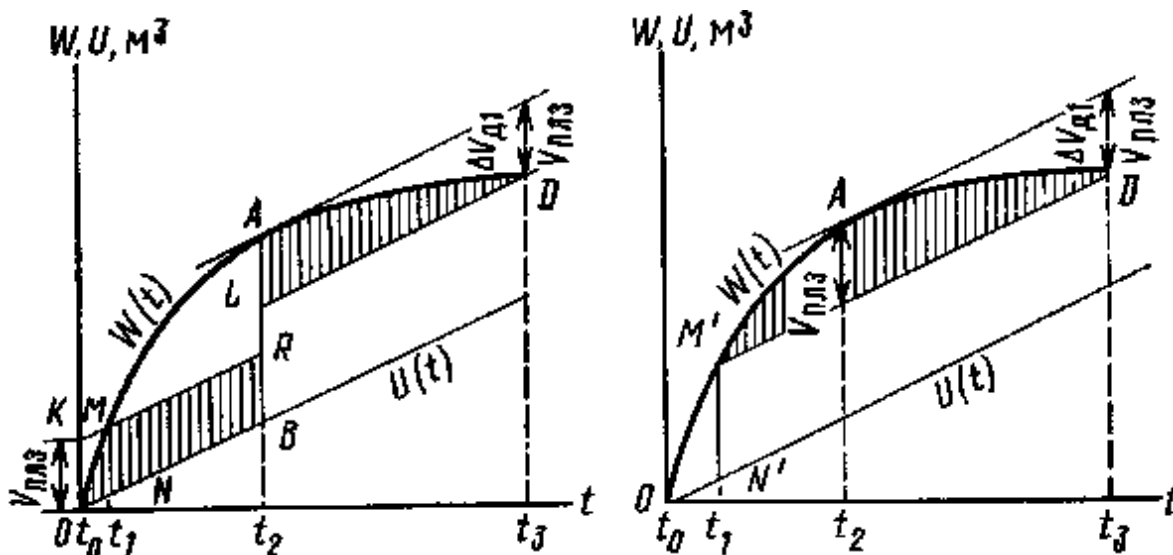


Рисунок 5.6 - Графический расчет наполнений и сбросов водохранилища при однократной работе по первому (а) и второму (б) правилам регулирования

График работы водохранилища по второму варианту регулирования строят следующим образом (рис. 5.6б). От нижней точки касания (точка  $D$ ) проводят линию  $DM$ , параллельную кривой отдачи  $U(t)$ , влево до пересечения с суммарной кривой стока  $W(t)$ . Точка пересечения этой линии с

кривой стока определит дату  $t_1$  окончания сброса и начала наполнения водохранилища. Суммарный объем сброса соответствует величине отрезка  $M'N'$ . Наполнение водохранилища начинается момента  $t_1$  и продолжается до момента  $t_2$  (точка верхнего касания  $A$ ). В точке  $t_2$  водохранилище наполнено до  $V_{НПУ}$ . В интервале  $t_2-t_3$  идет сработка и в конце дефицита (точка  $D$ ) оно срабатывается до  $V_{МО}$ .

Графики работы водохранилища при двухтактной работе с независимым циклом по первому и второму вариантам правил регулирования приведены на рис. 5.7.

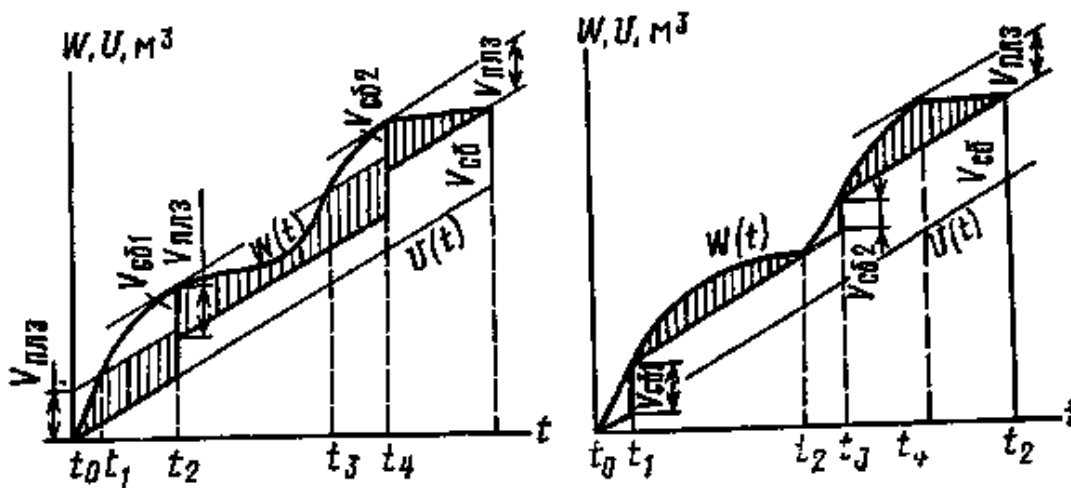


Рисунок 5.7 - Графический расчет наполнений и сбросов водохранилища при двухтактной работе по первому (а) и второму (б) правилу регулирования

Если кривая отдачи  $U(t)$  не прямая, а ломаная линия, т.е. водопотребление переменное, то это не вносит никаких принципиальных изменений в методику расчета. Точки верхнего касания находят путем перемещения суммарной кривой отдачи вертикально, параллельно самой себе до тех пор, пока какая-либо ее точка не совпадет с кривой стока, а по обе стороны от этой точки кривая потребления будет лежать выше кривой стока.

Аналогично находят и нижние точки касания. При этом следят за тем, чтобы при всех перемещениях суммарной кривой  $U(t)$  соблюдалось ее подобие и каждый излом кривой оставался на одной и той же вертикали.

Полные интегральные кривые используются также при приближенных расчетах водохранилищ по типу обратной задачи, то есть когда требуется по заданному стоку и полезному объему водохранилища определить наиболее целесообразное распределение отдачи в течение расчетного периода, построить суммарную кривую отдачи и установить режим наполнений и сбросов. Для этого на чертеже (рис. 5.8) ниже основной интегральной кривой стока строят вторую интегральную кривую, параллельную исходной и отстоящую от нее по вертикали на расстоянии, равном  $V_{плз}$ . Основную кривую принимают за линию пустого водохранилища, а кривую, смещенную вниз, – за линию наполненного водохранилища.

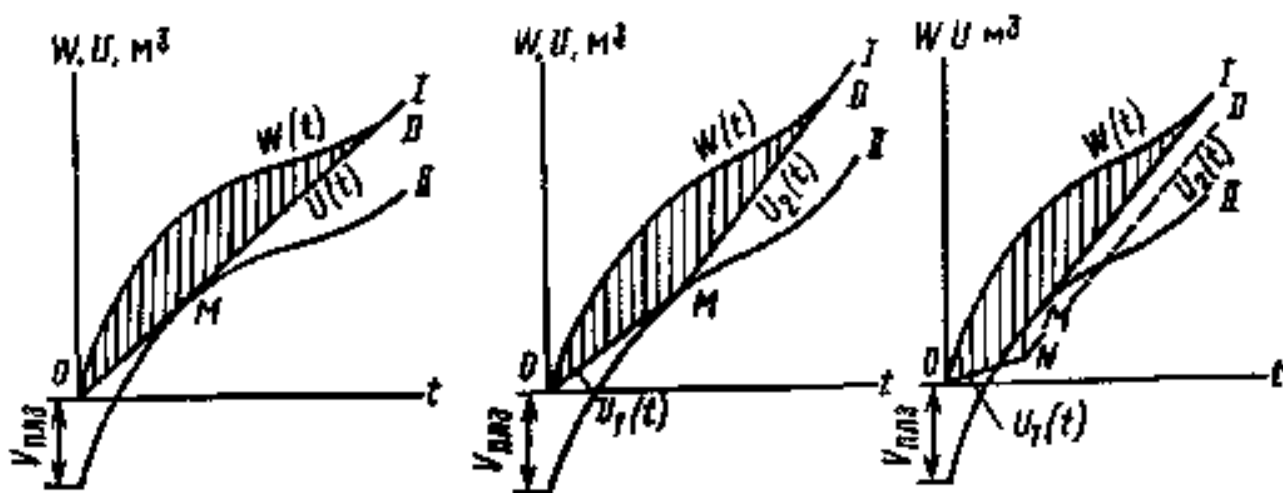


Рисунок 5.8 - Графический расчет водохранилища при заданном стоке и полезном объеме:

*а* и *б* - при полном использовании стока и соответственно при постоянной и переменной отдаче; *в* - при неполном использовании стока

При графических расчетах водохранилищ сезонного регулирования стока применяют также **разностную интегральную кривую**, которая характеризует непрерывный ход изменения разности суммарных объемов, стока и отдачи во времени:

$$W_r(t) = \int_0^t (Q - q) dt \cong \sum_1^t (Q_i - q_i) \Delta t_i$$

где  $W_r(t)$  - ордината разностной интегральной кривой стока и отдачи.

Разностную интегральную кривую строят в прямоугольных координатах (рис. 5.9), откладывая по оси абсцисс время  $t$  и по оси ординат  $W_r(t)$ . В тот период, когда разностная кривая имеет подъем, наблюдаются избытки, а когда кривая имеет спад - дефициты; в верхней экстремальной точке (максимум) осуществляется переход от избыточного стока к дефициту, а в нижней (минимум) - от периода дефицитов к периоду избыточного стока (рис. 5.9). Полезный же объем водохранилища  $V_{плз}$  определяется как наибольшая разность ординат предыдущей максимальной и последующей минимальной экстремальных точек разностной интегральной кривой. При этом на участке между указанными экстремальными точками касательная, проведенная к точке верхнего экстремума параллельно оси абсцисс, не должна пересекать разностную кривую.

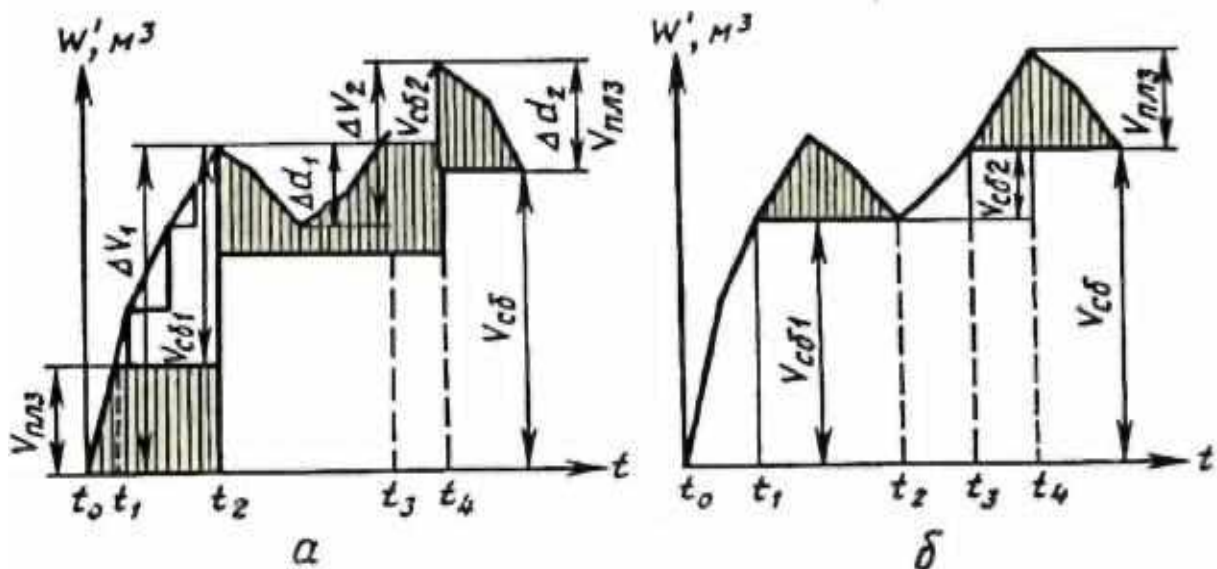


Рисунок 5.9 - Графический расчет водохранилища по разностной интегральной кривой стока и отдачи по первому (а) и второму (б) вариантам регулирования

Графики работы водохранилища с использованием разностной интегральной кривой строят так же, как по полной кривой. Однако вспомогательные линии, посредством которых устанавливают время наполнения водохранилища до  $V_{плз}$  и начало сбросов, проводят параллельно оси абсцисс, т.е. горизонтально.

## Лекция 6. Многолетнее регулирование стока

1. Сущность и общая методика расчета многолетнего регулирования
2. Расчеты многолетнего регулирования стока по календарным рядам
3. Расчет сезонной составляющей объема
4. Расчет многолетней составляющей
5. Расчеты многолетнего регулирования стока по обобщенным параметрам

### 1. Сущность и общая методика расчета многолетнего регулирования

Если регулирование стока в пределах года недостаточно для покрытия потребности в воде с заданной обеспеченностью ( $W_p < U_{бр}$ ), то применяют многолетнее регулирование стока.

Многолетнее регулирование - это перераспределение стока в течение многолетнего периода. В этом случае потребность в воде в маловодные годы обеспечивается за счет стока и сработки запасов воды в водохранилище, накопленной в многоводные годы.

Водохранилище многолетнего регулирования используют и для сезонного регулирования стока. Поэтому полезный объем водохранилища многолетнего регулирования стока условно делят на многолетнюю и сезонную составляющие:

$$V_{плз} = V_{мн} + V_{сез}, \quad (6.1)$$

где  $V_{мн}$  и  $V_{сез}$  – многолетняя и сезонная составляющие объема, м<sup>3</sup>.

Период сработки многолетней составляющей может изменяться от одного года до нескольких лет, сезонная составляющая используется ежегодно.

Емкость водохранилища многолетнего регулирования не должна быть чрезмерно большой – не более 2-3 годовых стоков.

При расчетах многолетнего регулирования стока за расчетный интервал времени  $\Delta t$  обычно принимают год; колебание стока и отдачи в течение расчетного интервала не учитывают.

Сток, отдачу, объем водохранилища и другие параметры при многолетнем регулировании выражаются как в абсолютных величинах (млн м<sup>3</sup>), так и относительных, т.е. в долях среднемноголетнего объема стока  $W_0$ .

Сток в долях среднемноголетнего объема стока называется модульным коэффициентом стока:

$$K_i = W_i / W_0 \quad (6.2)$$

Отдача водохранилища – коэффициентом регулирования стока:

$$\alpha = U / W_0 \quad (6.3)$$

Объем водохранилища характеризуется коэффициентом емкости водохранилища и представляет отношение полезного объема к среднегодовому стоку водного объекта:

$$\beta_n = V_{плз} / W_0 \quad (6.4)$$

Различают также степень использования стока, характеризуемую коэффициентом использования стока:

$$\eta = \frac{W - V_{сб}}{W}$$

где  $V_{ном}$  – годовой объем потерь;  $V_{сб}$  – среднегодовой объем холостого сброса. Показатели  $\alpha$  и  $\eta$  являются основными характеристиками условий регулирования стока и определяют условия обслуживания потребителей воды: размер полезной отдачи, долю потерь и т.п. При регулировании стока на жесткий график отдачи с относительно высокой обеспеченностью коэффициенты  $\alpha$  и  $\eta$  практически совпадают. При невысокой обеспеченности, т.е. при частых перебоях,  $\alpha > \eta$ .

При водохозяйственных расчетах многолетнего регулирования стока применяют как балансовые методы с использованием календарных рядов длительных гидрометрических наблюдений, так и обобщенные методы, в основу которых положено представление о речном стоке как вероятностном процессе. Очень часто эти методы дополняют друг друга.

## **2. Расчеты многолетнего регулирования стока по календарным гидрологическим рядам**

Расчеты многолетнего регулирования стока по календарным рядам применяют при наличии достаточно продолжительного периода гидрометрических наблюдений ( $n > 60$  лет). Расчеты выполняют таблично-цифровым или графическим способами, отдельно вычисляя сезонную  $V_{сез}$  и многолетнюю  $V_{мн}$  составляющие полезного объема.

Особенностью расчета водохранилища многолетнего регулирования является то, что полезная отдача обычно заранее жестко не задается. Задача ставится более широко: задаваясь различными значениями потребления, определить для каждого из них необходимый объем водохранилища, а затем на основе технико-экономических расчетов выбрать наивыгоднейший вариант и соответствующие этому варианту объем водохранилища и годовой объем отдачи.

## **3. Расчет сезонной составляющей объема**

Сезонную составляющую объема в долях среднегодового стока  $\beta_{сез}$  приближенно рассчитывают из условия необходимости покрытия сезонных дефицитов в воде в первый год после окончания маловодного периода, то есть когда многолетний запас исчерпан. При этом исходят из сред-

немноголетнего распределения стока по сезонам как наиболее характерного для данной реки. Считают, что в расчетном году сток равен отдаче  $K_{pe} = \alpha$ . Год делят на два сезона – половодье и межень. Отдача принимается постоянной в течение всего расчетного года. При этих условиях расчетную схему можно представить в виде полных интегральных кривых стока и отдачи, построенных в безразмерных координатах: по оси ординат отложена сумма модульных коэффициентов стока  $\sum_1^i K = \sum_1^i \frac{W_i}{W_0}$ , а по оси абсцисс - время межени ( $t_m$ ) и половодья ( $t_n$ ), в долях года, причем  $t_m + t_n = 1$  (рис. 6.1).

Из схемы следует, что при  $K_{pe} = \alpha$

$$\beta_{сез} = AC - BC. \quad (6.6)$$

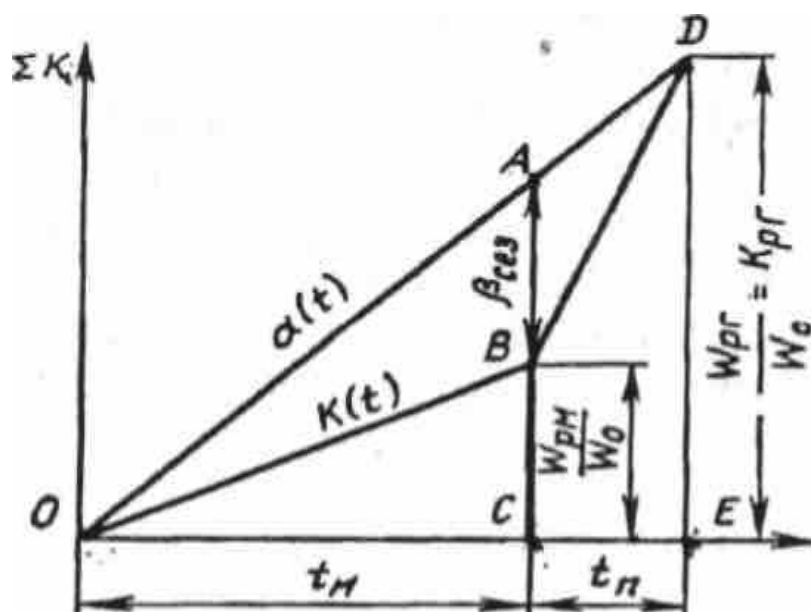


Рисунок 6.1 - Схема к расчету сезонной составляющей объема водохранилища

Из подобия треугольников  $ODE$  и  $OAC$  получаем  $AC / t_m = K_{pe} / I$ , откуда  $AC = K_{pe} \cdot t_m$ . Представляя  $BC = K_{pm} m_m$  и подставляя выражения для  $AC$  и  $BC$  в формулу (4.6), получаем

$$\beta_{сез} = K_{pe} \cdot t_m - K_{pm} m_m, \quad (6.7)$$

где  $K_{pe}$  и  $K_{pm}$  - модульные коэффициенты годового и меженного стока расчетной обеспеченности;  $m_m = W_m/W_0$  - доля среднего меженного стока в среднегодовом.



При равенстве коэффициентов вариации  $C_{v2}$  и  $C_{vm}$  формула (4.7) примет более простой вид:

$$\beta_{сез} = \alpha (t_m - m_m) \quad (6.8)$$

Для предельного случая - полного использования стока, т.е. когда  $\alpha = 1,0$

$$\beta_{сез} = t_m - m_m \quad (6.9)$$

Для определения величин  $m_m$  и  $t_m$  необходимо проанализировать типичное распределение стока по сезонам для многоводных, средних и маловодных лет.

При неравномерной отдаче, например, сосредоточенной в период вегетации, расчет по приведенным выше формулам дает заниженные результаты. В этом случае сезонную составляющую объема можно приближенно определить по зависимости

$$\beta_{сез} = \alpha_m t_m - \alpha m_m, \quad (6.10)$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент регулирования стока за межень, т.е.  $\alpha_m = U_m / W_0$ ;  $\alpha$  – коэффициент регулирования стока за год.

Если  $K = \alpha$ , и полная отдача происходит за период вегетации, например при орошении, сезонно-годовую составляющую приближенно определяют по уравнению

$$\beta_{сез} = \alpha (1 - m_g), \quad (6.11)$$

где  $m_g$  – доля стока периода вегетации от годового.

Для временных водотоков, когда весь сток проходит в половодье, сезонную составляющую полезного объема определяют по формуле М.В. Потапова:

$$\beta_{сез} = \alpha \beta_0, \quad (6.12)$$

где  $\beta_0$  – коэффициент объема, соответствующий полному использованию среднееголетнего стока со средним распределением его по сезонам.

#### 4. Расчет многолетней составляющей

*Расчет многолетней составляющей по календарным гидрологическим рядам.* При расчете по календарным рядам стока многолетнюю составляющую объема водохранилища определяют таблично-цифровым балансовым, а также графическим способами.

Таблично-цифровой расчет многолетней составляющей объема выполняют аналогично рассмотренному ранее расчету полезного объема при сезонном регулировании стока. Обычно расчет начинают с наиболее многоводного года, когда водохранилище наполнено до НПУ, и идут от года к году по ходу времени. Отдачу принимают постоянной в течение каждого года. Потери воды из водохранилища вычисляют по среднему за год наполнению.

При расчетах многолетнего регулирования стока на стадии предварительного анализа и приближенных вычислений применяют также и графические способы. Наиболее часто используют сокращенную интегральную кривую. Для построения сокращенной интегральной кривой, так же как и для полной, используют гидрограф стока  $Q(t)$  (рис. 6.2). Вычитая из всех расходов  $Q_i$  значение нормы стока  $Q_0$  и суммируя разности  $Q - Q_0$ , получаем

$$W_c(t) = \sum(Q_i - Q_0)\Delta t, \quad (6.13)$$

где  $W_c(t)$  - ордината сокращенной интегральной кривой.

Откладывая величины в координатах объем - время, получаем сокращенную интегральную (суммарную) кривую стока (рис. 6.2б).

Основные свойства сокращенной кривой следующие:

1. Если  $Q = \text{const}$ , то  $W_c(t)$  - прямая линия; для ступенчатого гидрографа  $W_c(t)$  будет ломаной линией.

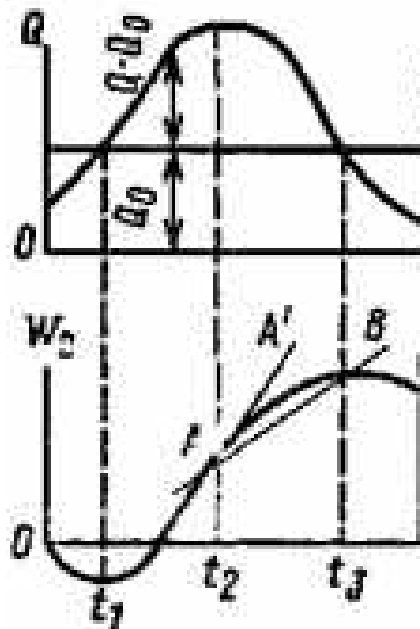


Рисунок 6.2 - Гидрограф стока (а) и сокращенная кривая стока (б)

2. Разность двух ординат сокращенной интегральной кривой равна стоку за соответствующий интервал времени, уменьшенному на объем воды за тот же интервал времени при постоянном расходе  $Q_0$ .

3. Тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной, проведенной к сокращенной кривой, выражает разность расходов  $Q - Q_0$ , а тангенс угла наклона, образуемого секущей с осью абсцисс, дает среднее значение разности  $Q - Q_0$ .

При  $dW_c/dt = 0$  сокращенная кривая имеет максимум или минимум, при этом  $Q = Q_0$ . Если  $dW_c/dt > 0$ , тангенс угла наклона касательной положительный (кривая имеет подъем) и  $Q > Q_0$ . Если же  $dW_c/dt < 0$ , тангенс отрицательный (кривая направлена вниз) и, следовательно,  $Q < Q_0$ .

4. Если  $Q_0$  принять равным среднему расходу за весь рассматриваемый период, то очевидно, что в конце периода ордината сокращенной кривой  $W_c(t) = 0$ , т.е. кривая приходит в точку, лежащую на оси абсцисс.

Сокращенная интегральная кривая имеет ряд преимуществ по сравнению с полной. На сокращенной кривой отчетливо выражены характер-

ные фазы стока - половодье и межень, многоводные и маловодные годы и периоды. Это делает сокращенную интегральную кривую наглядной и удобной для выполнения расчетов регулирования стока.

Поскольку при расчетах многолетнего регулирования сток, отдачу и объем водохранилища принято выражать в относительных величинах (в долях среднего годового стока), сокращенную интегральную (суммарную) кривую стока удобнее строить, откладывая по оси ординат сумму  $n(K_i - 1)$ , где  $K_i - 1$  модульный коэффициент стока ( $K_i = W_i/W$ ), а 1 - его среднее значение. Отдача выраженная в виде коэффициента зарегулирования стока  $\alpha = U_i / W$ , представляется через лучевой масштаб, на котором наклон лучей соответствует определенным значениям отдачи водохранилища  $\alpha$  (рис. 6.3). Задаваясь различными значениями  $\alpha$ , находят соответствующие им объемы многолетней составляющей объема ( $\beta_{mn}$ ), как наибольшее вертикальное расстояние между верхними и последующими нижними касательными, параллельными соответствующим лучам, характеризующим отдачу  $\alpha$ . Касательные проводят таким образом, чтобы линии не пересекали интегральную кривую.

Соответствующие им объемы многолетней составляющей  $\beta_{mn}$  определяют по формуле

$$P_{mn} = \Delta \sum (K - 1) - n(1 - \alpha), \quad (6.14)$$

где  $\Delta \sum (K - 1)$  – наибольшее вертикальное расстояние между верхними и нижними касательными;  $n$  - период дефицита.

Затем строят график  $\beta_{mn} = f(\alpha)$  (рис. 6.4). Суммируя  $\beta_{сез}$  и  $\beta_{mn}$ , найденные для различных значений  $\alpha$ , получают график зависимости  $\beta_{mn} + \beta_{сез} = f(\alpha)$ . Далее для каждого значения  $\alpha$  находят потери из водохранилища, после чего устанавливают полезную отдачу, т.е. отдачу без учета потерь в функции от  $\alpha$ .

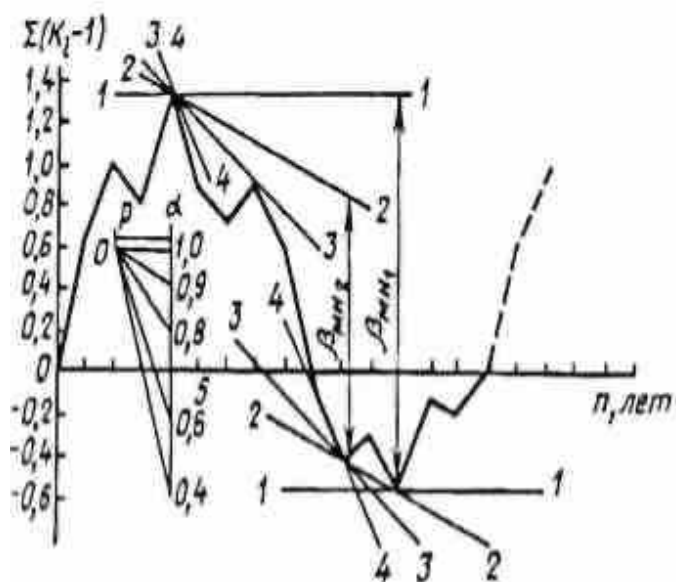


Рисунок 6.3 - Расчет  $\beta_{\text{мин}}$  по сокращенной интегральной кривой

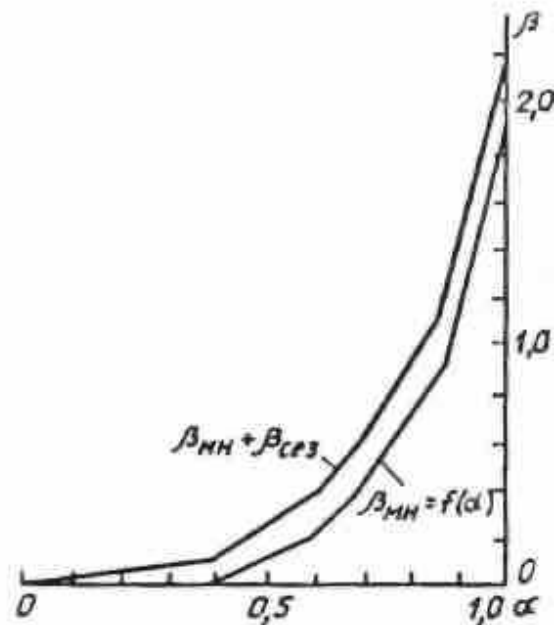


Рис. 6.4 - График зависимости  $\beta_{\text{мин}}$  и  $\beta_{\text{мин}} + \beta_{\text{сез}}$  от  $\alpha$

Расчеты по календарным рядам базируются на ограниченной выборке сочетаний различных режимов водотока, не отражающей всех сложных закономерностей изменения стока. Поэтому в современной проектной практике расчеты регулирования стока по календарным рядам обязательно дополняют и уточняют расчетами, основанными на использовании обобщенных статистических характеристик и теории вероятностей.

## 5. Расчеты многолетнего регулирования стока по обобщенным параметрам стока

Одним из первых методов многолетнего регулирования, основанным на обобщениях и использовании теории вероятностей и математической статистики, стал метод суммарных дефицитов отдачи, предложенный С.Н. Крицким и М.Ф. Менкелем. Этот метод положил начало применению обобщенных методов в водохозяйственных расчетах в нашей стране и сыграл положительную роль в дальнейшем развитии и совершенствовании расчетов регулирования стока. Впоследствии метод уточнялся и совершен-

ствовался. Теперь он представляет наиболее строгое теоретическое решение задачи многолетнего регулирования стока. Этот метод (метод отбора характерных групп наполнений водохранилища) основан на сложении кривых обеспеченности стока.

Необходимо определить вероятность (относительное число) таких лет, в течение которых заданная отдача  $\alpha$ , несмотря на наличие многолетней емкости, полностью не обеспечивается, т.е. имеются перебои в подаче гарантированного количества воды.

В те годы, когда  $K_i \geq \alpha$ , т.е. сток превышает отдачу, потребности в воде полностью удовлетворяются, даже если водохранилище не наполнено ( $\beta_{mn} = 0$ ). Это *бесперебойные* годы.

Годы, в которые годовой сток и многолетняя составляющая водохранилища недостаточны для покрытия  $\alpha$ , т.е. годы при  $K_i + \beta_{mn} < \alpha$  или  $K_i < \alpha - \beta_{mn}$ , *безусловно перебойные*.

Группу лет, для которых  $\alpha > K_i > \alpha - \beta_{mn}$ , называют *условно-перебойными*, или сомнительными. В отдельности каждый год этой группы бесперебойный, но в сочетании с предшествующими маловодными годами он может быть перебойным.

Непосредственные расчеты многолетнего регулирования стока данным методом очень трудоемки. Чтобы их облегчить, были разработаны обобщенные графики (номограммы), позволяющие решать задачи многолетнего регулирования стока. На графиках Я.Ф. Плешкова (рис. 6.5) представлена зависимость многолетней составляющей  $\beta_{mn}$  от коэффициента регулирования стока  $\alpha$ , коэффициента изменчивости годового стока  $C_v$  при значениях обеспеченности 75, 80, 86, 90, 95 и 97.

**Метод вероятных вариантов.** Предложенный А.Д. Саваренским в 1940 г. метод вероятных вариантов (или, как его еще называют, метод кривых обеспеченности наполнений водохранилища) занимает видное ме-

сто среди современных обобщенных методов расчета регулирования стока. Он позволяет определить не только обеспеченность гарантированной отдачи водохранилища, но и другие результаты регулирования стока: обеспеченности и объемы наполнения водохранилища, сбросов, перебоек и т.д. Этот метод дает возможность также выявить условия работы водохранилища и правильно наметить этапы его строительства и эксплуатации в период первоначального наполнения водохранилища, то есть в первый, второй и дальнейшие годы работы.

Сущность метода заключается в следующем. Учитывая, что объем наполнения водохранилища в конце какого-то интервала времени равен сумме объемов наполнения в его начале и притока за вычетом отдачи за этот интервал, анализируют наполнения водохранилища в конце каждого интервала. При этом если приток задан в виде кривой обеспеченности, то и параметры водохранилища задаются и получаются также в виде соответствующих кривых обеспеченности.

По заданным параметрам  $C_v$  и  $C_s$  строят кривую обеспеченности годового стока 1 (рис. 6.6). Ординаты кривой обеспеченности  $Kp = f(C_v, C_s, p)$  находят, пользуясь таблицами С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [5].

На этом же графике проводят горизонтальные линии, соответствующие ординатам  $\alpha$  (линия  $a' - a'$ ) и  $\alpha + \beta_{mn}$  (линия  $a - a$ ). Точка пересечения линии отдачи (линия  $a' - a'$ ) с кривой обеспеченности годового стока  $Kp = f(p)$  соответствует обеспеченности плановой отдачи без регулирования стока.

Ординаты безусловной кривой обеспеченности результатов регулирования (кривая 4, рис. 6.6) рассчитываются поэтапно по формулам полной вероятности. Эта кривая позволяет определить все основные параметры регулирования стока (фактическую отдачу, наполнение водохранилища, сбросы) в зависимости от обеспеченности.

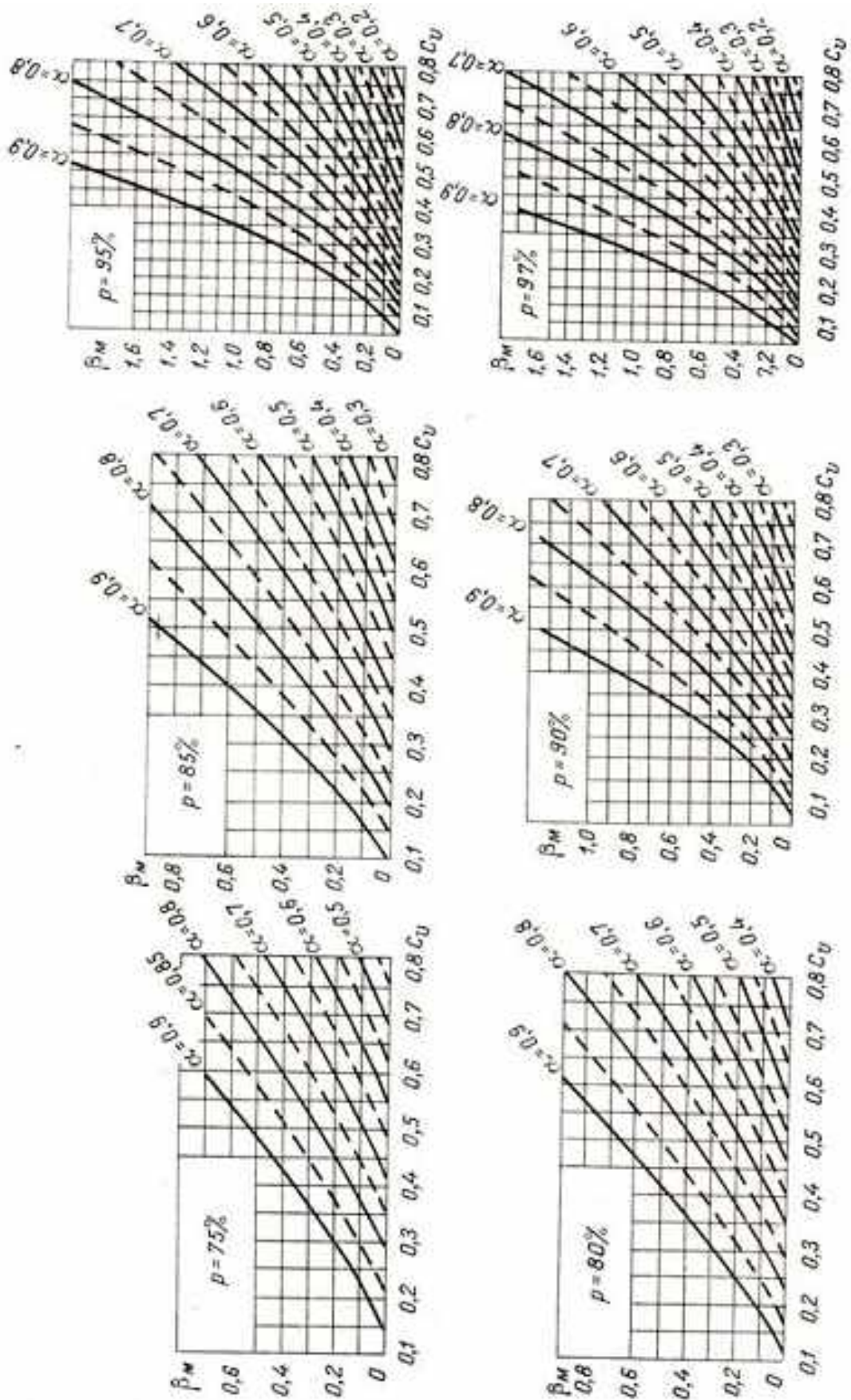


Рисунок 6.5 - Графики Я.Ф. Плешкова для определения многолетней составляющей емкости водохранилища при  $C_s = 2C_v$ ,  $r = 0$



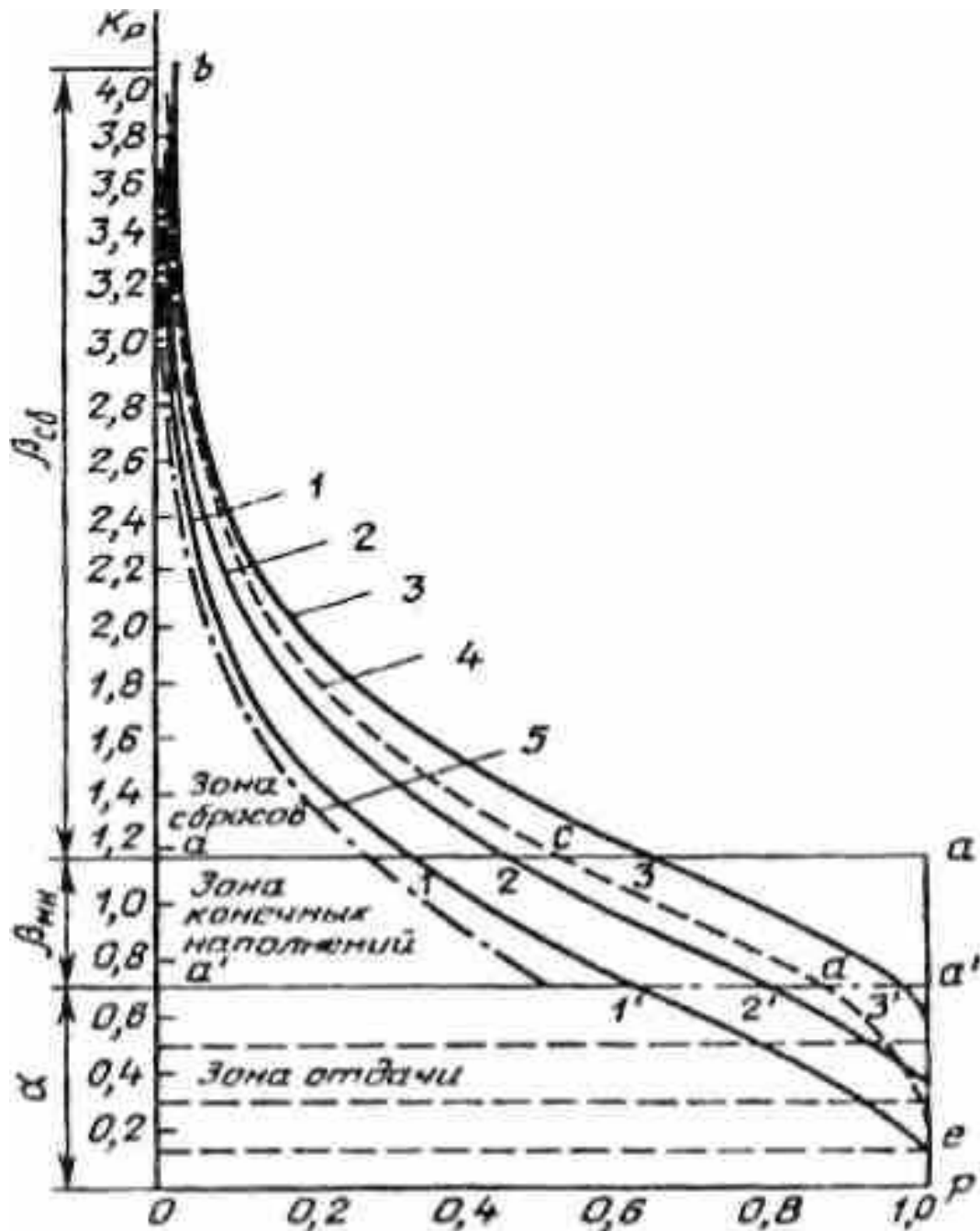


Рисунок 6.6 - Условные (1, 2, 3), безусловная (4) и обобщенная (5) кривые обеспеченности отдачи, конечных наполнений, сбросов и зарегулированного стока

Если перестроить безусловную кривую обеспеченности результатов регулирования стока, опустив ее верхнюю часть ( $bc$ ) на величину  $\beta_{\text{мн}}$  до линии, соответствующей отдаче  $\alpha$  (линия  $a' - a'$ ), то получим *обобщенную кривую обеспеченности зарегулированного стока* (кривая 5, рис. 6.6), которая, отражая результаты регулирования, характеризует сток ниже створа плотины водохранилища.

## Лекция 7. Регулирование стока половодий и паводков

1. Общая методика расчета трансформации паводочного стока
2. Расчеты регулирования стока половодий на основе уравнений баланса
3. Приближенные методы расчета трансформации паводков
4. Защита территории от наводнений
5. Компенсирующее и каскадное регулирование стока

### 1. Общая методика расчета трансформации паводочного стока

В период половодья (паводка) в целях предотвращения наводнения в нижнем бьефе часть излишков воды временно задерживается в водохранилище. При этом происходит некоторое повышение уровня воды сверх НПУ, т.е. уровень воды повышается до отметки форсированного подпорного уровня (ФПУ), а между ФПУ и НПУ образуется объем форсировки  $V_{\phi}$ . Максимальные расходы уменьшаются, паводок трансформируется (распластывается) в гидрограф сбросных расходов (рис. 7.1).

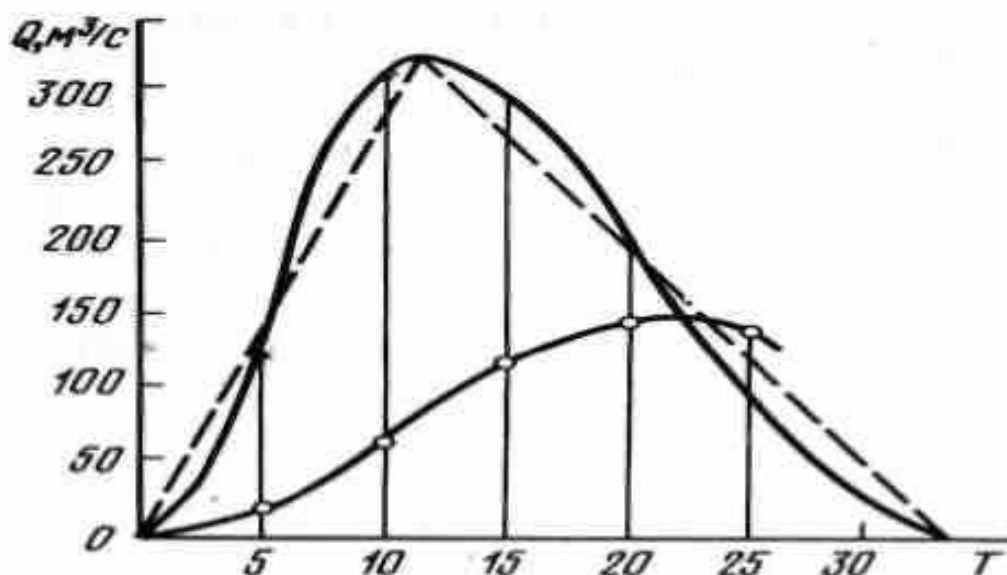


Рисунок 7.1 - Расчетный гидрограф паводка и график сбросных расходов

Создание объема форсировки, аккумулирующего часть стока паводочных вод, позволяет снизить максимальные расходы, поступающие в нижний бьеф водохранилища, и тем самым предотвратить наводнения на нижерасположенных участках реки, а также уменьшить размеры водосбросных гидротехнических сооружений. Вместе с тем повышение уровня воды в водохранилище выше НПУ влечет за собой увеличение высоты плотины и приводит к дополнительному затоплению и подтоплению земель. В связи с этим оптимальный объем, предназначенный для снижения максимальных расходов половодья (паводка) или борьбы с наводнениями в нижнем бьефе водохранилища, устанавливается на основе технико-экономических расчетов.

Излишки воды из водохранилища сбрасываются через водосбросные сооружения: наиболее распространены водосливы практического профиля без щитов или со щитами на гребне, а также донные водовыпуски с затворами.

В случае свободного (не подтопленного) истечения через водослив расход воды определяется по формуле

$$q = mB\sqrt{2g}H_0^{2/3} \quad (7.1)$$

при истечении из-под щита и для донного водовыпуска:

$$q = \mu\omega\sqrt{2gH_0}, \quad (7.2)$$

где  $m$  и  $\mu$  - коэффициенты расхода соответственно водослива и отверстия;  $B$  - ширина водослива, м;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h_\phi$  - полный напор с учетом скорости подхода, м;  $\omega$  - площадь отверстия, м<sup>2</sup>.

В случае каскадного расположения водохранилищ расчет регулирующего влияния системы водохранилищ на максимальные расходы - весьма ответственное дело, поскольку разрушение одного из водохранилищ каскада может привести к разрушениям нижерасположенных.

Регулирующее влияние на максимальные расходы системы водохранилищ определяют специальными расчетами, в которых учитывается целый ряд факторов: расположение водохранилищ по отношению друг к другу, их взаимное влияние и соотношение регулирующих объемов, скорости добегания воды по гидрографической сети, боковая приточность, регулирующие объемы естественных русел и др.

Для решения многих задач при проектировании, строительстве и эксплуатации водохранилищ кроме расчетных максимальных расходов воды необходимо иметь также расчетные гидрографы половодий и паводков.

Гидрографы максимального стока формируются под влиянием многих природных факторов (климатических, физико-географических и др.) и характеризуются расчетными максимальными расходами воды, продолжительностью половодья, полным объемом максимального стока и асимметрией очертания паводка.

Форму расчетного гидрографа нормами проектирования рекомендуется принимать по моделям наблюдавшихся половодий в расчетном створе или на реке-аналоге. Гидрографы половодья, отвечающие взятым расчетным максимальным расходам, называют расчетными гидрографами. Они рассчитываются по равнообеспеченным максимальным расходам воды.

## **2. Расчеты регулирования стока половодий (паводков) на основе уравнений баланса**

Водохозяйственный расчет водохранилища на пропуск максимальных расходов выполняют на основе уравнения баланса воды в водохрани-

лище. В общем виде баланс воды в водохранилище за время  $\Delta t$  можно выразить следующим дифференциальным уравнением:

$$Q\Delta t - q_{сб}\Delta t = \pm\Delta V, \quad (7.3)$$

где  $Q$  - расчетный расход во входном створе водохранилища, м<sup>3</sup>/с;  $q_{сб}$  - расход в створе водосбросного сооружения (сбросной расход), м<sup>3</sup>/с;  $\Delta V$  - изменение объема воды в водохранилище, м<sup>3</sup>.

Балансовые методы можно применять при любом гидрографе паводка и любом типе водосбросного сооружения.

**Графоаналитический метод М.В. Потанова.** Весь период паводка разбивают на равные промежутки времени. Их продолжительность выбирают такой, чтобы в течение этого интервала как приток  $Q$ , так и сбросной расход  $q$  можно было считать изменяющимся линейно. При этом одну из границ расчетных интервалов совместить с максимальной ординатой расчетного гидрографа половодья (паводка) (рис. 7.1). В этом случае уравнение баланса воды в водохранилище можно представить в следующем виде:

$$\frac{Q_H + Q_K}{2} \Delta t = \frac{q_H + q_K}{2} \Delta t \pm (V_K - V_H), \quad (7.4)$$

где  $Q_H, q_H, V_H$  - приток, сброс и объем воды в водохранилище в начале интервала времени;  $Q_K, q_K, V_K$  - то же в конце интервала.

Исходными данными для решения этого уравнения служат расчетный гидрограф, уравнение сбросных расходов и батиграфические характеристики водохранилища.

Преобразуем уравнение (7.4)

$$\frac{V_K}{\Delta t} + \frac{q_K}{2} = \bar{Q} + \left( \frac{V_H}{\Delta t} - \frac{q_H}{2} \right)$$

где  $\bar{Q} = \frac{Q_H + Q_K}{2}$

и обозначим

$$\frac{V_K}{\Delta t} + \frac{q_K}{2} = Z_1$$

$$\frac{V_H}{\Delta t} - \frac{q_H}{2} = Z_2$$

Таким образом получим  $Z_1 = \bar{Q} + Z_2$

Задаваясь слоем форсировки, определяют значения  $q$  и  $z$ , затем строят график зависимости  $Z_1 = f(q)$  и  $Z_2 = f(q)$  (рис. 6.4.1).

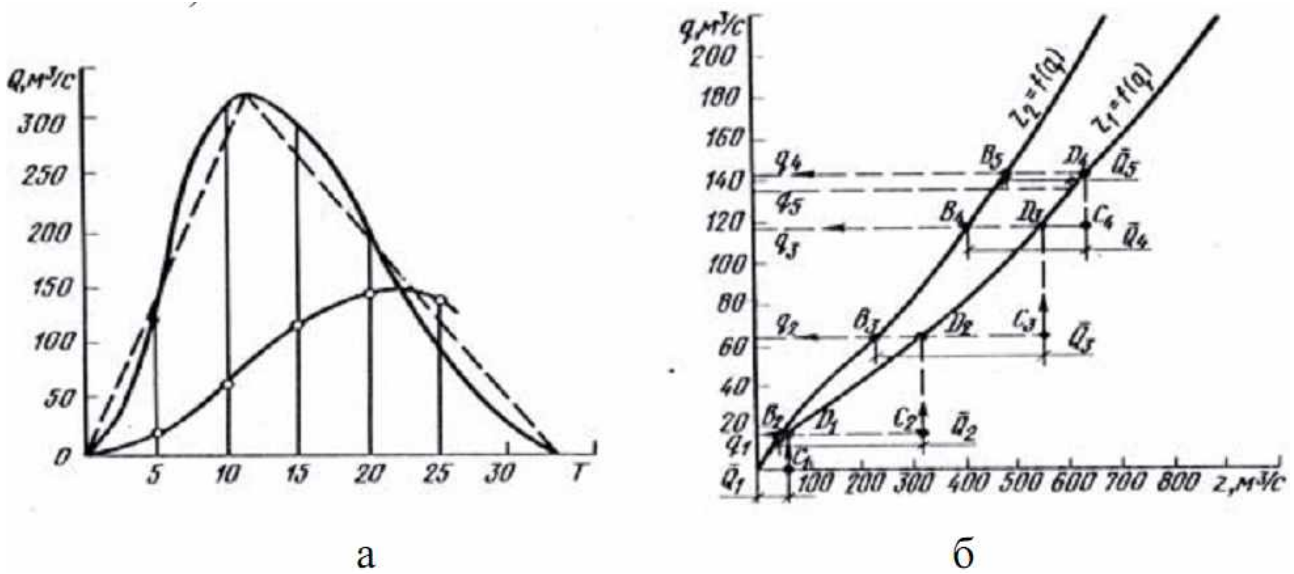


Рисунок 7.2 - Схема графоаналитического расчета трансформации паводка по способу М.В. Потапова

Расчет начинают с первого интервала времени  $\Delta t$ . По исходному гидрографу определяют среднее значение  $Q$  и откладывают его величину по оси  $Z$ , получают точку  $C_1$ . От нее проводят вертикаль  $C_1D_1$  до пересечения с кривой  $Z_1 = f(q)$ . Ордината  $D_1$  определит сбросной расход  $q_{c\bar{0}1}$  на конец первого интервала времени. Для того, чтобы найти  $q_{c\bar{0}2}$  на конец второго интервала, на кривой  $Z_2 = f(q)$  фиксируют точку  $B_2$ . От точки  $B_2$  откладывают вправо среднее значение  $Q$  для второго интервала.

От нее проводят вертикаль до пересечения с кривой  $Z_1 = f(q)$  и фиксируют точкой  $D_2$ . Ее ордината определит сбросной расход  $q_{c\bar{0}2}$  на конец второго интервала времени. Аналогично рассчитывают сбросные расходы для остальных интервалов времени. Расчеты продолжают до тех пор, пока среднее значение  $Q$  не будет располагаться левее кривой  $Z_1 = f(q)$ , что свидетельствует о том, что сбросные расходы начинают убывать, т.е. максимум уже пройден.

Полученные значения  $q_{сб}$  откладывают на гидрографе половодья и соединяют точки плавной линией. Точка пересечения кривой сбросных расходов с нисходящей частью гидрографа определит момент сбросного расхода и его величину.

### 3. Приближенные методы расчета трансформации паводков

На предварительных стадиях проектирования при рассмотрении нескольких вариантов размещения гидроузлов и их параметров допускается применять приближенные способы расчета трансформации паводка. При массовом водохозяйственном проектировании водосборных сооружений широко применяется приближенный метод Д.И. Кочерина.

Способ Д.И. Кочерина основывается на некоторых допущениях: расчетный гидрограф половодья (паводка) схематизируется в виде треугольника или трапеции; сбросные расходы ( $q$ ) через водослив, отметка которого совпадает с НПУ, изменяются по линейной зависимости; полезную отдачу, а также потери воды из водохранилища на испарение и фильтрацию ввиду незначительных их значений по сравнению с объемами половодья (паводка) не учитывают.

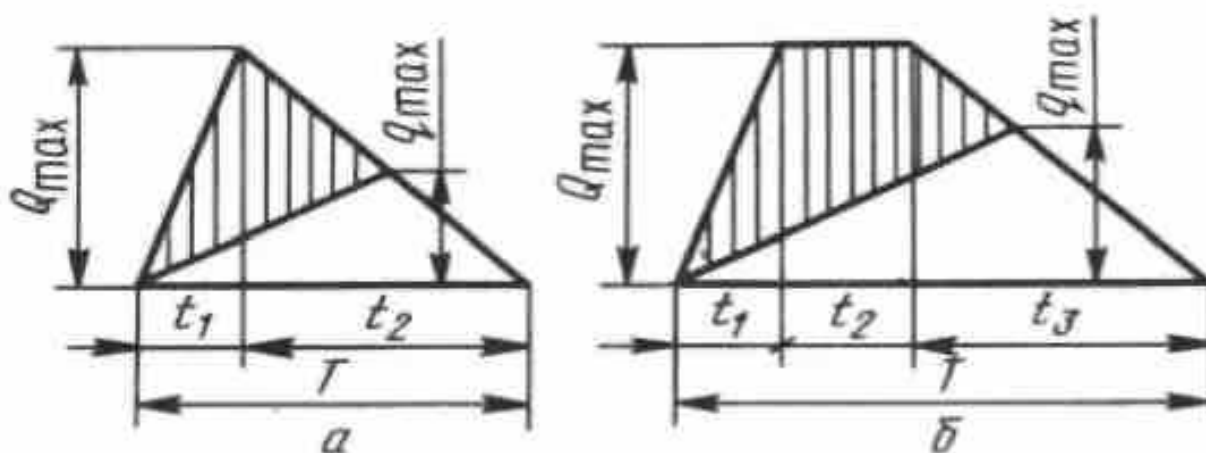


Рисунок 7.3 - Схемы к расчету трансформации паводка при треугольной (а) и трапецидальной (б) формах гидрографа

Эти допущения существенно упрощают расчеты трансформации паводка, при этом ошибки не превышают 5-10%, т.е. находятся в пределах точности гидрометрических измерений.

При треугольной форме гидрографа половодья (рис. 7.3а) расчетные формулы имеют вид:

объем форсировки (объем водохранилища выше НПУ)

$$V_{\phi} = W_n (1 - q_{сб.мах} / Q_{мах}); \quad (7.5)$$

максимальный сбросной расход

$$q_{сб.мах} = Q_{мах} (1 - V_{\phi} / W_n), \quad (7.6)$$

где  $W_n = 0,5 T Q_{мах}$  - объем половодья;  $T$  - продолжительность паводка, сек;  $Q_{мах} = Q_{1\%}$ .

При схематизации гидрографа половодья (паводка) по форме трапеции (рис. 7.3б): объем форсировки

$$V_{\phi} = W_n (1 - \eta q_{сб.мах} / Q_{мах}); \quad (7.7)$$

максимальный сбросной расход

$$q_{сб.мах} = Q_{мах} / \eta (1 - V_{\phi} / W_n), \quad (7.8)$$

где  $W_n$  - объем половодья, который рассчитывается:

$$W_n = 0,5 Q_{мах} (T + t_2); \quad \eta = T / (T + t_2). \quad (7.9)$$

Расчет трансформации паводка ведут графоаналитическим способом. Задаваясь различными слоями форсировки  $h_{\phi}$ , находят значения форсированного подпорного уровня:

$$\Phi_{ПУ} = НПУ + h_{\phi}. \quad (7.10)$$

Форсированный объем ( $V_{\Phi ПУ}$ ) снимают с кривой объемов (батиграфические кривые  $V = f(H)$ ).

Объем форсировки находят как разность  $V_{\phi} = V_{\Phi ПУ} - V_{НПУ}$ . Задаваясь различными значениями ширины водослива, определяем расходы, пропускаемые водосливом при принятых слоях форсировки:

$$q = mB\sqrt{2g} h^{2/3} \quad (7.11)$$



где  $m$  - коэффициент расхода водослива.

Строим кривые зависимости  $q_{сб.мах} = f(h_{\phi}, b)$  (рис. 7.4).

Пересечение кривой  $q_{сб.мах} = f(h_{\phi})$  с кривыми  $q_{сб.мах} = f(h_{\phi}, b)$  дает искомые слои форсировки и  $q_{сб} \text{ мах}$ .

Из графиков видно, что чем больше  $h_{\phi}$ , тем меньше сбросные расходы и меньше требуемая ширина водослива.

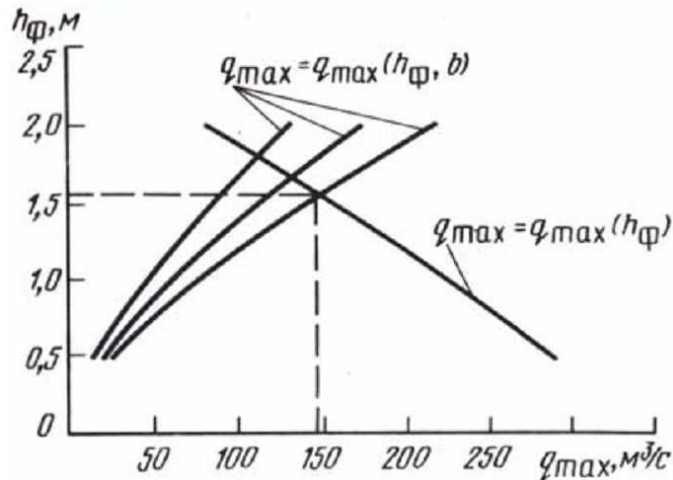


Рисунок 7.4 - Кривые сбросных расходов

Способ Д.И. Кочерина применим и в случаях, когда объем водохранилища к моменту прихода половодья частично сработан ниже НПУ или опустошен до УМО. Тогда появляется дополнительный регулирующий объем  $V_p$ , способный вместить часть объема половодья до начала работы водослива и форсировки водохранилища.

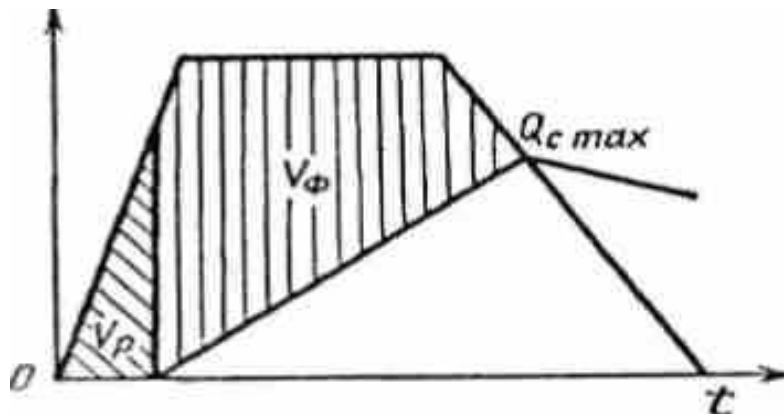


Рис. 7.5 - Схема к расчету трансформации паводка при частично сработанном водохранилище

В этом случае расчетная схема при схематизации гидрографа по трапеции примет вид, представленный на рисунке 7.5, а максимальный сбросной расход определится по формуле, предложенной А. В. Огиевским:

$$q_{сб.маx} = Q_{маx} / \eta [1 - (V_{\phi} / W_n - V_p)]. \quad (7.12)$$

Все рассмотренные примеры применения метода Д.И. Кочерина относятся к конструкции водосбросного сооружения в виде глухого водослива. Для других типов сооружений допущение о линейном изменении сбросных расходов может привести к большим ошибкам.

#### 4. Защита территории от наводнений

Особое положение занимает задача регулирования высокого стока для уменьшения наводнений в нижнем бьефе. При этом величина максимального сбросного расхода  $q$  является основным критерием для выбора решения.

Задача может рассматриваться в двух вариантах:

1) известна емкость водохранилища; требуется определить максимальный сбросной расход воды в половодье или в паводок заданной обеспеченности;

2) задан допустимый для нижнего бьефа сбросной расход, который не должен превышать; требуется найти емкость водохранилища для обеспечения этого условия.

Водохранилища, специально предназначенные для борьбы с наводнениями, строятся сравнительно редко; это назначение водохранилищ обычно стараются совместить с другими водохозяйственными целями. При этом полезная емкость водохранилища, регулирующая сток для повышения малых расходов и форсированный объем, временно заполняемая

при пропуске паводка, эксплуатируется с соблюдением специфических требований к размерам упомянутых емкостей, режиму работы водохранилища и конструкциям водосброса.

Наименьший форсированный объем водохранилища при заданном сбросном максимуме и, наоборот, наименьший сбросной максимум при заданной емкости достигаются при условиях, если водосброс обеспечивает пропуск в нижний бьеф заданной величины сбросного расхода в течение всего периода времени.

Этому условию в наилучшей степени удовлетворяют не водосливы с затворами, а донные отверстия (водоспуски), работающие под более значительными напорами и потому имеющие большую пропускную способность при одной и той же площади отверстий. Указанное свойство донных отверстий заставляет обращаться к ним не только в случае борьбы с наводнениями в нижнем бьефе, но и для уменьшения затоплений в пределах водохранилища независимо от условий разлива реки ниже плотины.

## **5. Компенсирующее и каскадное регулирование стока**

**Компенсирующее регулирование стока.** Компенсирующее регулирование относится к сложным видам регулирования стока.

Компенсирующее регулирование - это покрытие дефицита в воде путем попусков из водохранилищ, расположенных выше водозабора. К этому виду регулирования стока прибегают, когда по каким-то условиям (топографическим, гидрогеологическим, экономическим и т.д.) нельзя создать водохранилище в месте водозабора, и для того, чтобы достигнуть наибольшего эффекта регулирования стока путем маневрирования объемами водохранилищ, расположенных на одной речной системе.

Компенсирующее регулирование сводится к созданию необходимых добавок из водохранилища на нижерасположенные участки реки.

Простейшая схема компенсирующего регулирования стока представлена на рисунке 7.6: водохранилище расположено на притоке в створе  $B$ , а водозаборное сооружение, через которое обеспечивается подача воды потребителям, - ниже по течению в створе  $A$ . Между створами водохранилища и водозабора находится часть площади водосбора, на которой сток не зарегулирован. Требуемую отдачу  $q_A$  в месте водозабора (створ  $A$ ) обеспечивают за счет как незарегулированного стока, так и попусков воды из водохранилища на притоке.

В период повышенного стока, то есть когда  $Q_A > q_A$  потребление полностью обеспечивается за счет стока с незарегулированной части водосбора. В это время водохранилище на притоке наполняется; из него делаются лишь попуски воды в санитарных целях. В маловодные периоды, когда сток с незарегулированной части водосбора не обеспечивает заданной отдачи в нижнем створе ( $Q_A < q_A$ ), из водохранилища делают попуски для компенсации дефицита.

Таким образом, режим работы компенсирующего водохранилища подчинен условиям водопотребления в нижнем створе. Условия работы водохранилища довольно сложные.

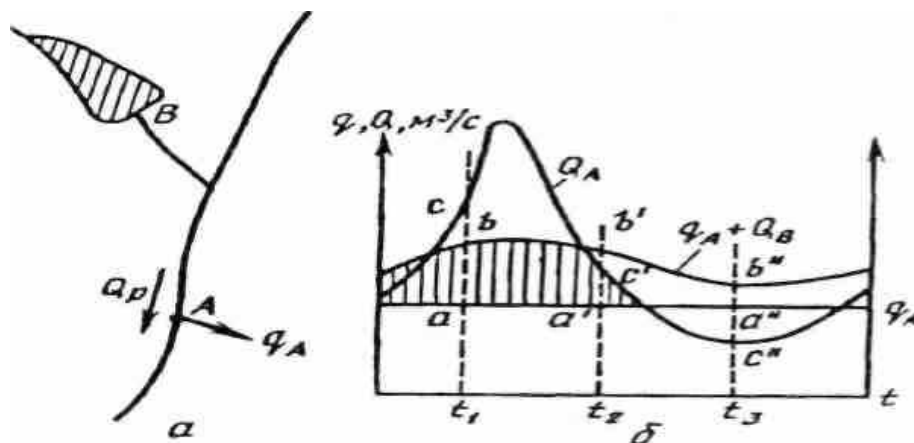


Рисунок 7.6 - Компенсирующее регулирование стока:  
а – схема расположения водохранилища; б – расчетная схема

Компенсирующее регулирование может быть сезонным (годовым) или многолетним. Его расчеты выполняют с использованием календарных рядов стока, а также обобщенными методами. При этом в зависимости от исходных данных и необходимой детальности расчетов применяют различные методы.

Для определения полезного объема компенсирующего водохранилища в створе  $B$  на одном чертеже совмещают расчетный гидрограф стока  $Q_A(t)$  и требуемой отдачи  $q_A(t)$  за год в створе водозабора  $A$  (рис. 5.1.1 б). Кроме того, от линии отдачи вверх откладывают ординаты расчетного гидрографа в створе  $B$  и строят график  $(q_A + Q_B) = f(t)$ .

Допускается, что временем добегания воды от створа  $B$  до створа  $A$  можно пренебречь. Рассмотрим, какой расход можно забрать для наполнения водохранилища в характерные моменты, времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ . В момент  $t_1$  расход в створе  $A$  значительно превышает требуемую отдачу, то есть  $Q_A > q_A$ , поэтому весь расход притока можно задержать в водохранилище, и при этом останется еще свободный избыток стока, равный ординате  $bc$ , который поступает с незарегулированной части водосбора. В момент  $t_2$  приток  $B$  дает расход  $a'b'$ , но из него можно оставить в водохранилище только ту часть, которая является избытком стока над потреблением у точки  $A$ , равную ординате  $a'c'$ . Наконец, в момент  $t_3$  в нижнем створе имеет место дефицит, и из расхода  $Q_B$  задерживать ничего нельзя.

Таким образом, избыточный сток  $W'в$  притока  $B$ , который может быть использован для компенсирующего регулирования, определяется площадью (на рис. 7.6 заштрихована), ограниченной линией отдачи и кривыми  $Q_A(t)$  и  $(q_A + Q_B) = f(t)$ . Сопоставляя найденный избыточный сток с дефицитом, устанавливают тактность работы водохранилища и определяют необходимый полезный объем водохранилища, компенсирующего регулирования стока. Расчет выполняют балансовым таблично-цифровым

способом, при этом учитывают потери воды, определяют наполнение водохранилища, сбросы излишков воды, строят график его работы.

Полезный объем компенсирующего водохранилища не может быть меньше полезного объема, необходимого для регулирования стока в створе водозабора на основной реке.

Расчет компенсирующего регулирования стока при наличии календарных гидрометрических наблюдений может быть проведен также и с помощью интегральных кривых стока и отдачи.

**Каскадное регулирование стока.** Цепочку водохранилищ, расположенных последовательно на одном водотоке, называют каскадом.

Условия работы водохранилищ, входящих в каскад, отличаются от условий изолированно работающих. Каждое нижнее по течению водохранилище использует сток, прошедший через вышележащие ступени каскада и подвергшийся их воздействию. В результате этого в режим стока по длине реки вносятся изменения: суммарный его объем уменьшается вследствие изъятия воды на нужды водопотребления и потери на испарение с поверхности водохранилищ, кроме того, происходит перераспределение стока во времени.

Если бьефы плотин, создающих водохранилища, примыкают друг к другу, и между ними не остается площадей водосбора с незарегулированным стоком, имеет место *сомкнутый каскад*. В этом случае образующие каскад водохранилища связаны между собой гидравлически, и режим работы нижнего по течению водохранилища отражается на уровнях воды в нижнем бьефе вышележащей ступени. При этом создаются благоприятные условия для более полного перераспределения и использования речного стока в целях гидроэнергетики, судоходства, лесосплава, а также других отраслей народного хозяйства.

Если же подпор от нижерасположенного водохранилища не достигает нижнего бьефа вышерасположенного, и между ступенями каскада имеются незарегулированные участки реки, каскад называют *несомкнутым*. Очевидно, что такой каскад с точки зрения использования стока менее предпочтителен.

Водоохранилища каскада могут работать в независимом или компенсирующем режиме. При независимом режиме каждое водохранилище регулирует сток в целях удовлетворения запросов прикрепленных к нему потребителей. Когда же водохранилище подчинено условиям работы других ступеней или каскада в целом, имеет место компенсирующий режим.

Расчеты регулирования стока каскадом водохранилищ выполняют табличным или графическими способами по календарным гидрологическим рядам, а также обобщенными методами.

Для выполнения расчетов по календарным рядам необходимо иметь для каждого створа данные о стоке с внутригодовым распределением по расчетным интервалам времени, объемы отдач, графики потерь воды, характеристики водохранилищ. Расчеты начинают с самого верхнего по течению реки водохранилища, последовательно переходя к нижерасположенным. Например, при графическом способе расчета строят интегральные кривые стока и отдачи в косоугольных координатах для верхнего створа и определяют полезный объем верхнего водохранилища, его наполнения и сбросы (рис. 7.7а). Далее по данным гидрометрических наблюдений во втором по течению створе каскада строят интегральную кривую стока для следующей ступени. Вычитая из ординат этой кривой наполнения первого водохранилища, получают интегральную кривую стока для второго водохранилища с учетом работы вышерасположенного (рис. 7.7б). По полученной исправленной кривой и заданной отдаче находят полезный объем и наполнение второго водохранилища.

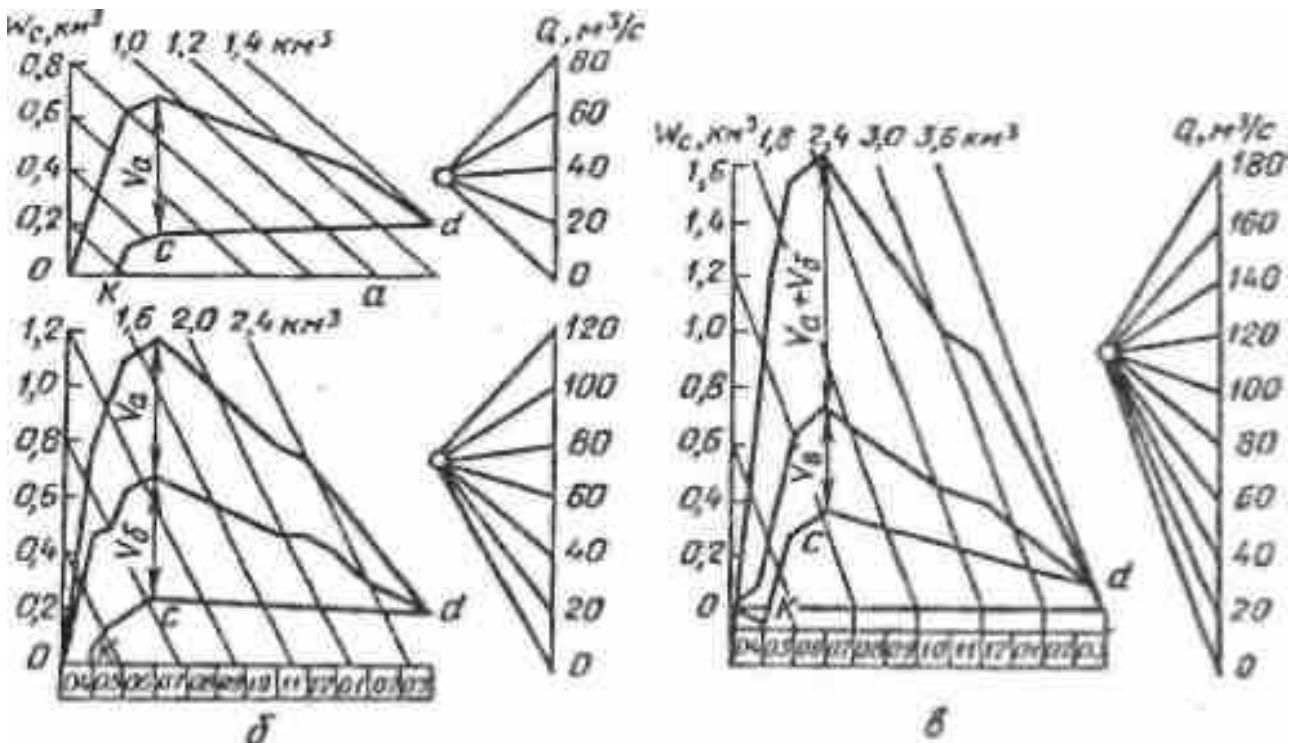


Рисунок 7.7 - Схема каскадного независимого регулирования при трех водохранилищах:

а, б, в – первая, вторая и третья ступени каскада;  $V_a$ ,  $V_b$  и  $V_v$  – полезные объемы водохранилищ каскада

Аналогично рассчитывают и следующие ступени каскада (рис. 7.7в). При больших расстояниях между створами каскада следует учитывать время добега воды от одного створа к другому.

Такова же последовательность расчетов каскадного независимого регулирования и при табличном способе.

В обобщенных методах расчета каскада водохранилищ применяют метод статистических испытаний, моделируют искусственные гидрологические ряды большой длительности (1000 лет и более), учитывая при этом коррелятивные связи между расходами в различные интервалы времени в одном и том же створе, между створами и расходами основной реки.

Взаимодействие водохранилищ в каскаде – весьма сложный процесс, на который оказывают влияние большое число взаимосвязанных факторов (гидрологических, водохозяйственных, экономических, экологических и др.). В связи с этим при расчетах каскадов широко применяют метод системного подхода и математического моделирования.



## Лекция 8. Эксплуатация водохранилищ

1. Подготовка водохранилищ к эксплуатации
2. Служба эксплуатации водохранилища, ее задачи
3. Правила использования водохранилищ
4. Наблюдения за состоянием водохранилища
5. Регулирование стока на переменную отдачу (диспетчерские графики)

### 1. Подготовка водохранилищ к эксплуатации

Перед заполнением водохранилища выполняется комплекс мероприятий по подготовке его к эксплуатации. В его состав входят лесосводка и лесочистка, санитарная подготовка территории водохранилища и зон водозаборов, инженерная защита и др.

Сооружение многих водохранилищ сопряжено с затоплением значительных лесных площадей. Зона сработки водохранилища от НПУ до уровня на 2 м ниже максимальной сработки должна быть очищена от леса, мелколесья и кустарника, оставлять можно пни высотой не более 50 см.

Проводят санитарную очистку территории населенных пунктов, животноводческих ферм, промышленных предприятий и мест массового загрязнения (свалки, скопления навоза, бытовых отходов и т.п.), попадающих в зоны воздействия водохранилищ; перенос кладбищ и скотомогильников. На территории населенных пунктов, попадающих в зону затопления, удаляют все сооружения и объекты, возвышающиеся над землей более чем на 50 см. Строительный мусор и другие остатки сжигают, металлический лом вывозят за пределы водохранилища.

Кроме указанных мероприятий при санитарной подготовке водохранилища для охраны грунтовых вод от загрязнения закрывают (тампони-

руют) все артезианские, геологоразведочные и другие скважины. Строят очистные сооружения коммунальных и промышленных предприятий. Запрещают сброс в водохранилище неочищенных сточных вод и твердых отходов.

Чтобы поддерживать качество воды в водохранилище в соответствии с санитарными нормами, в районе водохранилища предусматриваются водоохранная и санитарная зоны, прибрежная полоса.

*Водоохранная зона* водохранилища – это прибрежная территория (полоса) шириной 500-2000 м и более от уреза воды при НПУ, на которой запрещается строить предприятия, загрязняющие водоемы, использовать пестициды и другие ядохимикаты, размещать склады с минеральными удобрениями, химикатами, нефтепродуктами, вырубать лес, если это не предусмотрено водоохранными мероприятиями, пасти скот, устраивать кладбища, скотомогильники и т.д.

*Санитарная зона* создается на водохранилищах, имеющих питьевое назначение. Ее ширина от 100 до 1000 м. К этой территории предъявляются еще более повышенные требования, чем к водоохранной зоне.

*Прибрежная зона* – это территория, на которой запрещается распахивать земли, размещать садовые участки, пионерские лагеря, лодочные станции, автостоянки. Она располагается на расстоянии 35-100 м от уреза воды в зависимости от уклона поверхности: чем больше уклон, тем шире зона. Предусматривается также расширение прибрежной зоны с учетом переформирования берега в течение 5-10 лет. В прибрежной зоне создают лесозащитные полосы.

Большое внимание при создании водохранилищ уделяется инженерной защите, к которой относятся: обвалование территории, укрепление берегов и откосов земляных сооружений, устройство волноломных и волноотбойных сооружений, подсыпка (намыв) берегов и защитных пляжей.

## **2. Служба эксплуатации водохранилища, ее задачи**

Техническая эксплуатация водохранилища осуществляется специальной эксплуатационной службой. В ее задачи входят:

- оперативное управление водными ресурсами водохранилища для обеспечения плановой водоподачи и поддержания нормативных уровней верхнего и нижнего бьефов;

- систематический контроль за состоянием водохранилища и сооружений, проведение необходимых ремонтных работ;

- безаварийный пропуск половодий, паводков, льда, шуги и плавающих предметов через водосбросные сооружения;

- проведение мероприятий по уменьшению потерь воды из водохранилища, по борьбе с переформированием берегов, заилению и зарастанием водохранилища;

- регулярное измерение уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, а также расходов воды потребителям, попусков и сбросов в нижний бьеф;

- охрана водных ресурсов водохранилища от загрязнения и истощения.

Руководящим документом, на основе которого осуществляется эксплуатация водохранилища, являются «Правила использования водохранилищ».

## **3. Правила использования водохранилищ**

Основным нормативным документом, регламентирующим использование водохранилищ являются правила использования водохранилищ.

Правила использования водохранилищ разрабатываются в соответствии с Водным кодексом РФ и постановлением Правительства РФ от 22 апреля 2009 г. № 349 «Об утверждении Положения о разработке, согласо-

вании и утверждении правил использования водохранилищ, в том числе типовых правил использования водохранилищ».

Разработка правил использования предусмотрено для водохранилищ, включенных в перечень, утвержденный распоряжением Правительства РФ от 14 февраля 2009 г. № 197-р. "Об утверждении перечня водохранилищ, в отношении которых разработка правил использования водохранилищ осуществляется для каждого водохранилища", а также для проектируемых и строящихся водохранилищ объемом 10 млн. куб.м и более.

Правила использования водохранилищ (далее – Правила) состоят из двух основных документов:

- правил использования водных ресурсов;
- правил технической эксплуатации и благоустройства водохранилища.

При проектировании новых водохранилищ разрабатываются, кроме основных, временные правила на период строительства и первоначального заполнения водохранилища.

Правила подлежат согласованию с федеральными органами исполнительной власти в соответствии с установленным порядком.

Основными задачами использования водных ресурсов водохранилищ являются удовлетворение нужд водопотребителей и водопользователей в водных ресурсах и обеспечение безопасного функционирования основных гидротехнических сооружений водохранилища, а в случае достаточной полезной емкости водохранилищ, и регулирование речного стока путем управления режимами наполнения и сработки водохранилищ с обеспечением нормативной безопасности населения и хозяйственных объектов в верхних и нижних бьефах гидроузлов водохранилищ.

ПИВР должны содержать следующие основные разделы: характеристика гидроузла, водохранилища и их возможностей; основные характеристики водотока; состав и описание гидротехнических сооружений водо-

хранилища; основные параметры водохранилища; требования по безопасности в верхнем и нижнем бьефах; водопользование и объемы водопотребления; регулирование режима функционирования водохранилища; порядок гидрометеорологического обслуживания; оповещение о режимах функционирования водохранилища и сведения о действиях, осуществляемых при возникновении аварий и чрезвычайных ситуаций.

Под технической эксплуатацией и благоустройством водохранилища понимается совокупность водохозяйственных, инженерных, санитарных, экологических и организационных мероприятий, осуществляемых с целью обеспечения надлежащего технического, санитарного и экологического состояния рассматриваемого водохранилища и нижнего бьефа его гидроузла, оптимизации взаимодействия водохранилища с окружающей средой.

Осуществляются эти мероприятия в соответствии с правилами технической эксплуатации и благоустройства водохранилищ (ПТЭБ).

Главными задачами ПТЭБ являются оптимизация и повышение эффективности комплексного использования водных, земельных, биологических, минеральных и рекреационных ресурсов водохранилища за счет установления основных видов эксплуатационных мероприятий, проводимых на основе зонирования водохранилища и прилегающих к нему прибрежных территорий.

ПТЭБ должны содержать следующие основные разделы: описание водохранилища и гидротехнических сооружений; зоны воздействия водохранилищ; мероприятия, осуществляемые при эксплуатации водохранилища и при возникновении аварий и чрезвычайных ситуаций; ограничения эксплуатации водохранилища и мероприятия по поддержанию его надлежащего санитарного и технического состояния; наблюдения за состоянием водохранилища, входящих в его состав сооружений и учет использования его водных ресурсов.

В ПТЭБ приводится перечень всех гидротехнических и иных сооружений расположенных в пределах акватории, на берегах и в водоохранной зоне рассматриваемого водохранилища, которые влияют или могут влиять на его использование. В перечень вносятся все основные параметры сооружений в соответствии с формами ведения государственного водного реестра. При разработке ПТЭБ рекомендуется создание геоинформационной системы водохранилища со всеми необходимыми слоями.

ПТЭБ должны содержать перечень мероприятий, осуществляемых при эксплуатации водохранилища, в том числе, в зимний период и в период пропуска паводков, а также осуществляемых при эксплуатации водохранилища в случае возникновения аварий и иных чрезвычайных ситуаций (паводки, штормовой ветер, сложная ледовая обстановка, пропуск вод в катастрофически большом количестве, землетрясение и другие).

#### **4. Наблюдения за состоянием водохранилища**

Эксплуатационный персонал гидроузла ведет постоянный учет притока и расходования воды из водохранилища, наблюдения за состоянием водохранилища и гидротехнических сооружений, руководствуясь при этом соответствующими инструкциями и постановлениями.

Для гидрометрического и гидрометеорологического обслуживания на водохранилище оборудуют гидрологические посты и станции. Их число и размещение зависят от размеров и очертания водохранилища и назначаются при разработке проекта. К основным гидрологическим сооружениям относятся гидрологические посты во входном створе водохранилища и у плотины, посты на боковых притоках. Сведения о наличном объеме за каждый период определяют по среднему уровню воды в водохранилище.

Органы эксплуатации проводят водобалансовые наблюдения, измеряя осадки, поверхностный и подземный приток воды в водохранилище, расходы воды на производственные нужды, испарение, фильтрацию, сбросные расходы.

В состав наблюдений включают также измерения пьезометрических уровней в различных частях сооружений, фильтрационных расходов через плотину и в обход ее, объема заиления водохранилища. Ежегодно после прохождения половодья или в установленные сроки уточняют кривые площадей и объемов, которые изменяются из-за переформирования берегов, оползней, заиления и отмирания водной растительности. Обычно со временем площадь водной поверхности увеличивается, а средняя глубина уменьшается.

Зимой служба эксплуатации принимает меры по предохранению сооружений от воздействия льда при его вертикальном и горизонтальном смещениях, по борьбе с обмерзанием решеток и затворов гидросооружений.

Ведение наблюдений за состоянием водохранилища, осуществляется на единой геоинформационной основе в соответствии с нормативными и методическими документами Минприроды России и Росгидромета. Результаты наблюдения приводятся к формам, соответствующим формам ведения государственного мониторинга водных объектов и государственного водного реестра.

#### **4. Регулирование стока на переменную отдачу (диспетчерские графики)**

В процессе эксплуатации водохранилища всегда приходится иметь дело с режимами, более или менее отличающимися от расчетных.

В этих условиях для управления работой водохранилища разрабатывают специальные правила, на основе которых эксплуатационная служба обеспечивает в любое время года гарантированную водоотдачу, выявляет избытки воды для возможного использования их на повышение отдачи, уменьшает перебои отдачи за пределами расчетной обеспеченности, снижает (или исключает) холостые сбросы, не допускает переполнения водохранилища выше НПУ и ФПУ. Основным документом этих правил - *диспетчерский график* водохранилища.

Диспетчерский график строят на основе анализа возможных режимов работы водохранилища в различных гидрологических условиях. По оси ординат откладывают объемы воды в водохранилище ( $V$ , млн  $\text{м}^3$ ) или уровни воды ( $H$ , м), а по оси абсцисс - месяцы (декады) года. Серией кривых поле графика разделено на несколько зон, каждая из которых соответствует режиму работы водохранилища с определенной отдачей (рис. 8.1): 1 - гарантированной  $q = q_p$ ; 2 - повышенной  $q_s > q > q_p$ , 3 - полной повышенной  $q_s = q$ , 4 - ограниченной  $q < q_p$ .

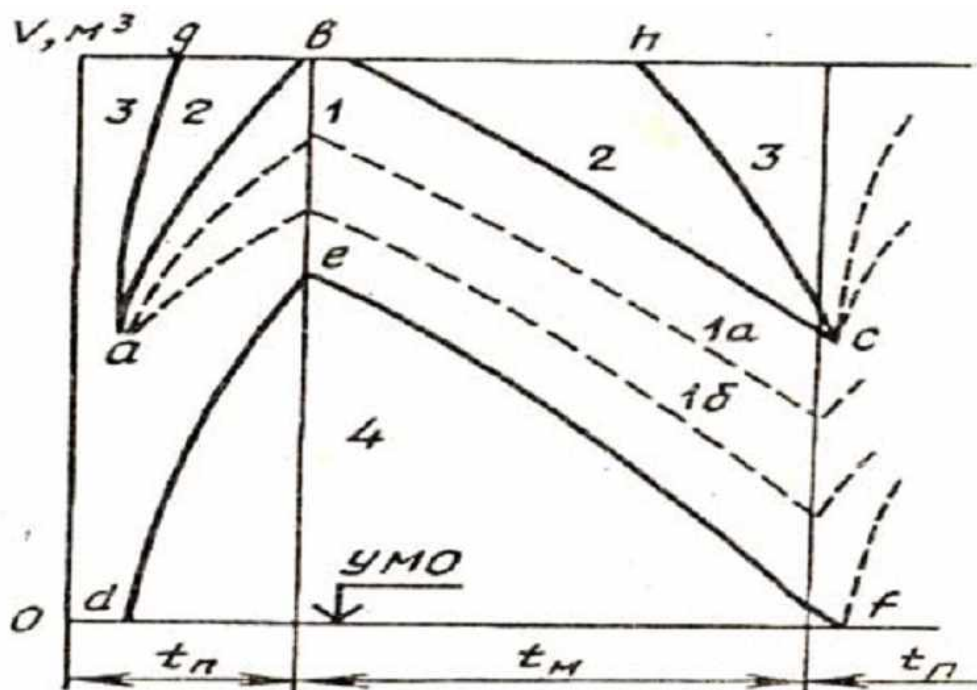


Рисунок 8.1 - Диспетчерский график работы водохранилища



Зоны ограничены соответствующими линиями: *Противоперебойная* линия, представляющая собой верхнюю границу зоны гарантированной отдачи, состоит из двух ветвей:

а) ветвь опорожнения, ограничивающая зону гарантированной отдачи в период межени и не допускающая чрезмерной сработки водохранилища (линия *bc*);

б) ветвь весеннего наполнения, обеспечивающая создание к концу половодья необходимого запаса воды для поддержания отдачи в межень (линия *ab*).

*Противосбросовая* линия, представляющая собой нижнюю границу зоны с отдачей, повышенной в пределах до максимального водопотребления установки (во избежание сбросов) состоит из двух ветвей:

а) ветвь предполоводного опорожнения, обеспечивающая освобождение к началу половодья некоторой части емкости для аккумуляции высоких вод (линия *hc*);

б) ветвь наполнения, предотвращающая чрезмерно быстрое заполнение водохранилища, т.е. сводит к минимуму холостые сбросы (линия *ag*).

*Линия пониженной отдачи* также имеет две ветви.

а) ветвь наполнения (линия *de*) строится для обеспечения заполнения водохранилища и поддержания гарантированной отдачи в период, следующий за окончанием критического маловодья;

б) ветвь опорожнения (линия *ef*) ограничивает допустимую сработку водохранилища в маловодный период и предотвращает необоснованный переход в зону ограниченной отдачи.

Кроме того, на диспетчерский график нередко наносят противоаварийную линию, назначение которой - не допустить превышение ФПУ.

Формы диспетчерских графиков зависят от вида регулирования стока, характера внутригодового распределения стока, соотношения между

гарантированной и избыточной отдачами. При построении графиков учитывают сроки наступления раннего и позднего половодья, его дружность или растянутость.

В практике управления водохранилищами диспетчерские графики применяют совместно с батиграфическими характеристиками. Установив по уровню воды с помощью кривой  $V(H)$  запас воды в водохранилище, диспетчер наносит точку, соответствующую моменту наблюдения, на диспетчерский график и в зависимости от того, в какую зону графика попала точка, принимает решение о расходах подачи воды потребителям.

Расчет и построение диспетчерских графиков - весьма трудоемкое дело, требующее, кроме того, большого опыта и навыков. В настоящее время используют математические модели и комплекс стандартных программ, которые в совокупности с ЭВМ образуют автоматизированную систему управления (АСУ) водными ресурсами водохранилища или сложной водохозяйственной системы (ВХС).

## Лекция 9. Водохранилище и окружающая природная среда

1. Воздействие регулирование стока на окружающую природную среду
2. Влияние водохранилища на русловые процессы, формирование берегов, рыбное хозяйство, судоходство, хозяйственную деятельность
3. Охрана водных ресурсов водохранилища от загрязнения
4. Экономическая оценка мероприятий по регулированию стока

Народно-хозяйственное значение водохранилищ велико, и оно, безусловно, будет возрастать. Вместе с тем их создание – это пример глубокого вмешательства человека в природные процессы на обширных территориях. Последствия, вызванные созданием водохранилищ, сказываются на природе и хозяйстве прилегающих и отдаленных территорий.

### **1. Воздействие регулирование стока на окружающую природную среду**

**Влияние на климат.** Водохранилища вносят заметные изменения в местный метеорологический режим.

Под влиянием водохранилищ в прибрежной полосе, как правило, уменьшается континентальность климата: ход температур становится более плавным, суточная амплитуда температур воздуха увеличивается, весенние заморозки прекращаются в более ранние сроки, а осенние наступают позже и т.д. В районе крупных водохранилищ несколько увеличиваются количество осадков, скорость и повторяемость ветров.

В нижних бьефах глубоководных водохранилищ значительно изменяется термический режим. Особенно сильно это проявляется в районах с холодным климатом. В нижних бьефах повышается влажность, наблюдаются туманы, образуются полыньи.

**Влияние водохранилищ на флору и фауну.** Создание водохранилищ вызывает существенные изменения почв, растительности и животного мира. Затопление территории приводит к полной гибели наземной растительности. В зоне мелководного постоянного затопления также почти полностью отмирает древесно-кустарниковая и изменяется травянистая растительность. Вдоль берегов водохранилищ в зоне умеренного климата при глубинах 2,0-2,5 м формируется пояс из тростника и камыша.

В зоне сильного подтопления (УГВ менее 1 м) большинство деревьев либо гибнет, либо сильно угнетается. В зонах умеренного и слабого подтопления ( $h_{зв} > 1$  м) водное и минеральное питание растений, как правило, улучшается, и прирост древесины увеличивается иногда на 50-70%. В нижнем бьефе водохранилищ вследствие изменения гидрологического режима реки, сокращения продолжительности и частоты весенних разливов происходит ухудшение свойств пойменных почв, снижение в 1,5-2,0 раза урожайности лугов и значительное сокращение прироста древостоев.

Во время заполнения водохранилищ, продолжающегося иногда в течение нескольких лет, весьма заметно падает численность многих видов животных из-за гибели молодняка в результате непрерывно меняющихся условий увлажнения. При лесоочистке ложа водохранилища уничтожаются места обитания животных. Переформирование берегов, а также колебания уровня воды в процессе эксплуатации водохранилищ отрицательно влияют на животных и вызывают их массовую миграцию.

## **2. Влияние водохранилища на русловые процессы, формирование берегов, рыбное хозяйство, судоходство, хозяйственную деятельность**

**Затопление и подтопление земель.** При заполнении водохранилищ происходит затопление значительных площадей. В среднем 85-95% водной поверхности водохранилищ приходится на затопленные земли.

В связи с подъемом УГВ после заполнения водохранилища образуется зона подтопления. Ширина зоны подтопления может быть весьма значительной и измеряться многими километрами. К отрицательным последствиям подтопления относятся: заболачивание земель в зоне избыточного увлажнения и засоление почвы в лесостепной и степной зонах, подтопление домов, ухудшение санитарного состояния местности и т.д.

**Переформирование берегов и дна.** Частые колебания уровня воды в период эксплуатации водохранилищ, ветровое волнение, которое на них значительно больше, чем на незарегулированных реках, и береговые течения вызывают размывы и обрушение берегов. Процессы абразии необычайно активны и протекают длительное время, исчисляемое десятилетиями. Они приводят к отступлению берегов на десятки и сотни метров, изменению глубин, образованию подводных отмелей, заилению и изменению объема и площади водохранилища.

**Переселение населения и перенос объектов народного хозяйства из зон воздействия водохранилища.** Создание водохранилищ, особенно крупных, приводит к необходимости переселения большого числа людей и переносу объектов народного хозяйства.

Переселение населения, перенос и строительство населенных пунктов и хозяйственных объектов на новом месте сопряжено с большими затратами. Эти затраты обычно определяются по принципу восстановления прежнего состояния. Для построенных в нашей стране водохранилищ они составили около 2 млрд руб., т.е. более 18% общей стоимости гидроузлов.

**Дополнительные потери воды.** За счет разности между испарением с водной поверхности водохранилища и с той же территории до затопления, включающей поверхность суши и реки в естественных условиях, появляются дополнительные потери воды, которые в отдельных районах играют немалую роль в общем объеме безвозвратного водопотребления.

Наряду с потерями на испарение вода из водохранилищ теряется на фильтрацию через дно и берега. Эти потери также значительны и в зависимости от гидрогеологических условий колеблются от 12 до 36% среднего объема воды в водохранилище за год.

**Влияние водохранилищ на рыбное хозяйство.** Перераспределение водохранилищами речного стока во времени и по территории нарушает сложившиеся условия существования и размножения рыб. Изменяются гидрологический, термический, гидрохимический и гидробиологический режимы, а значит и условия передвижения, размножения и питания рыб.

Плотины гидроузлов преграждают путь рыбе к местам нереста. Вследствие уменьшения длительности и высоты половодья происходит сокращение нерестовых площадей, что неблагоприятно сказывается на условиях нереста и откорма молоди, ее роста.

Особенно неприятны для рыбы суточные и недельные колебания уровней воды в верхнем и нижнем бьефах водохранилищ. В период нереста резкие колебания уровня приводят к смыву или пересыханию икры соответственно при подъеме или спаде воды. Зимой резкое понижение уровня воды может вызвать преждевременный уход рыбы из зимовальных ям или, наоборот, ее закупорку в зимовальных ямах ледяными глыбами, что приводит к снижению воспроизводства, а нередко и к массовой гибели рыбы.

### **3. Охрана водных ресурсов водохранилища от загрязнения**

Обеспечение чистоты воды в водохранилищах – одна из главных проблем их создания и эксплуатации. При разработке проектов создания водохранилищ и правил их эксплуатации необходимо учитывать интересы потребителей в отношении обеспечения необходимого качества воды.

Наиболее строгие требования к качеству воды предъявляют коммунальное водоснабжение, а также рыбное хозяйство. Для ирригационных водохранилищ важна степень минерализации воды.

Водоохранилища – гигантские отстойники. Вследствие значительного уменьшения скорости течения воды в них происходит выпадение взвешенных наносов, в десятки раз уменьшается мутность воды, повышается прозрачность, снижается ее бактериальное загрязнение.

Однако необходимо учитывать и целый ряд отрицательных последствий влияния водохранилищ на качество воды.

В начальный период, особенно впервые 2-3 года, на качестве воды отрицательно сказываются последствия затопления почвенного покрова, кустарника, леса, населенных пунктов. В этот период в водохранилище интенсивно развиваются биогенные процессы (гниение и т.д.), которые сопровождаются выделением сероводорода и метана, увеличивается количество бактерий, изменяются вкус и цвет воды.

В последующем на качество воды в водохранилище основное влияние оказывают гидробиологические процессы, а также антропогенные факторы.

Замедление скорости течения воды, снижение ее турбулентного перемешивания, изменение термического режима приводят к образованию застойных зон, дефициту кислорода, ослаблению самоочищающейся способности водохранилища, накоплению биогенных элементов (сероводорода, метана, аммиака и т.д.). Избыток биогенных элементов (в первую очередь азота и фосфора, поступающих со сточными водами с промышленных предприятий и с полей) в условиях повышенных температур и при значительном дефиците кислорода создает благоприятные условия для чрезмерного развития отдельных представителей фитопланктона, что приводит к «цветению» воды. При цветении уменьшается количество кисло-

рода, ухудшается химико-биологический режим воды, выделяются токсические элементы, что не позволяет использовать водную растительность для сельскохозяйственного производства. Для борьбы с цветением применяют различные средства: повышенный водообмен, уменьшение мелководий, разведение растительноядных рыб, выращивание тростника на мелководьях, применение химических препаратов (например, медного купороса). Однако эффективность этих средств пока невысока.

Из всего вышесказанного следует, что при проектировании, строительстве и эксплуатации водохранилищ должны быть проанализированы все возможные последствия их влияния на окружающую природную среду и найдены решения, обеспечивающие экономический эффект при минимуме нарушений в природе и восполнение причиняемого ущерба.

#### **4. Экономическая оценка мероприятий по регулированию стока**

Создание водохранилищ и проведение мероприятий по регулированию стока требуют больших затрат материальных средств.

Единовременные капитальные вложения по гидроузлу с водохранилищем складываются из стоимости строительства водоподпорного, водосбросного сооружений и других устройств по регулированию стока  $K_c$  и затрат на компенсацию ущерба, нанесенного созданием водохранилища различным отраслям народного хозяйства и отдельным гражданам  $K_e$ :

$$K = K_c + K_e \quad (8.1)$$

Капитальные вложения на строительство гидроузла  $K_c$  зависят от многих факторов: назначения и размеров гидроузла, района и условий строительства, принятых конструктивных решений.

Компенсационные вложения  $K_e$  слагаются из затрат на следующие цели: перенос или восстановление зданий, сооружений, оборудования, транс-



портных средств и других основных фондов; восстановление на новом месте сельскохозяйственных угодий вместо затопленных водохранилищем; лесосводка в зоне постоянного затопления и посадка лесных насаждений на новом месте; рыбохозяйственное освоение водоема (строительство сооружений, обеспечивающих проход рыб в верховье рек на нерест, восстановление естественного воспроизводства проходных и полупроходных рыб, устройство нересто-выростных хозяйств и т.д.); транспортное освоение водохранилища - увеличение глубин, строительство шлюзов и пристаней, оборудование подходов к ним и т. п.; санитарная подготовка ложа водохранилища перед затоплением; инженерная защита от затопления и подтопления населенных пунктов, городов, отдельных предприятий; сохранение (ограждение или перенос) исторических памятников, попадающих в зону затопления.

На основе сметно-финансовых расчетов определяют общие капитальные вложения на сооружение водохранилища  $K$ .

На стадии составления технико-экономических обоснований, схем, а также сравнительных оценок при разработке технических (технорабочих) проектов пользуются нормативами удельных капитальных вложений в водохозяйственное строительство.

При проектировании водохранилищ обычно рассматривается несколько вариантов. Для оценок их экономической эффективности определяют удельные стоимостные показатели (к. на  $1 \text{ м}^3$ ): стоимость  $1 \text{ м}^3$  воды, задержанной в водохранилище

$$c_1 = (K / V_{\text{НПВ}}) 100; \quad (8.2)$$

стоимость  $1 \text{ м}^3$  воды в полезном объеме

$$c_2 = (K / V_{\text{пз}}) 100; \quad (8.3)$$

и себестоимость  $1 \text{ м}^3$  воды, забираемой потребителями, отнесенная к створу ПЛОТИНЫ

$$c = (I / U_T) 100; \quad (8.4)$$

где  $I$  - ежегодные издержки, руб;  $U_T$  - объем отдачи за год, м<sup>3</sup>.

Ежегодные издержки включают отчисления на амортизацию (восстановление), капитальный ремонт, эксплуатационные расходы (содержание штата, текущий ремонт, охрана, административно-хозяйственные расходы, противопаводковые работы, борьба с заилением, зарастанием водохранилища, с ледовыми явлениями и т.д.). Их устанавливают на основе нормативных документов и сметно-финансовых расчетов.

## **Список литературы**

### **Основная:**

1. Железняков Г.В. Инженерная гидрология и регулирование стока: учебник / Г.В. Железняков, Е.Е. Овчаров. М.: Колос, 1993. 464 с.
2. Иванов А.И. Гидрология и регулирование стока: учебник / А.И. Иванов, Т.А. Неговская. М.: Колос, 1979. 384 с.
3. Овчаров Е.Е. Практикум по инженерной гидрологии и регулированию стока: учебное пособие / Е.Е. Овчаров, Н.Н. Захаровская, Н.В. Прошляков и др. М.: Колос, 1995. 224 с.

### **Дополнительная:**

4. Авакян А.Б. Водохранилища / А.Б. Авакян, В.П. Салтанкин, В.А. Шарапов. М.: Мысль, 1987. 328 с.
5. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты / А.М. Владимиров. - Л.: Гидрометиздат, 1990. 368 с..
6. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
7. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ / В.С Вуглинский. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
8. Евстигнеев В.М. Речной сток и гидрологические расчеты / В.М Евстигнеев. - М.: МГУ, 1990. 304 с.
10. Крицкий С.Н. Гидрологические основы управления речным стоком / С.Н. Крицкий, М.Ф. Менкель. М.: Наука, 1981. 249 с.
11. Плешков Я.Ф. Регулирование речного стока. Водохозяйственные расчеты / Я.Ф. Плешков. Л.: Гидрометеиздат, 1973. С. 560.
14. Раткович Д.Я. Гидрологические основы водообеспечения / Д.Я. Раткович. - М.: ИВП РАН, 1993. 428 с.
15. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.

## Оглавление

Введение.....	3
Лекция 1. Задачи и виды регулирования речного стока.....	5
Лекция 2. Водохранилища и их характеристики.....	12
Лекция 3. Общая методика расчета водохранилищ.....	21
Лекция 4. Потери воды и заиление водохранилищ.....	26
Лекция 5. Сезонное (годовое) регулирование стока.....	34
Лекция 6. Многолетнее регулирование стока.....	53
Лекция 7. Регулирование стока половодий и паводков.....	66
Лекция 8. Эксплуатация водохранилищ.....	81
Лекция 9. Водохранилище и окружающая природная среда.....	91
Список литературы.....	99

**Гаджиев Магомед Кебедович**

**ОСНОВЫ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ:  
РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЧНОГО СТОКА**

Курс лекций

для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки 280400 – «**Природообустройство**»,  
специальность 280401 - «**Мелиорация, рекультивация и охрана земель**»

Редактор

Формат 60×84 1/16 Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл. п.л. 5,0. Уч. изд.л. 5,0. Тираж 100 экз. Заказ №

---

**Отпечатано в РИО ДГТУ**

**367015, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70.**