

# ОПОРНЫЙ КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

## Лекция 1. ВОДНЫЙ БАЛАНС И РЕЧНАЯ СИСТЕМА

- 1.1. Предмет инженерной гидрологии и регулирования стока, связь с другими дисциплинами.
- 1.2. Водный баланс земного шара и речных бассейнов.
- 1.3. Водные ресурсы и влияние на них антропогенной деятельности.
- 1.4. Гидрографические характеристики речного бассейна.
- 1.5. Речная долина, русло поймы реки.
- 1.6. Плесы и перекаты.
- 1.7. Поперечная циркуляция.

### 1.1. Предмет инженерной гидрологии и регулирования стока, связь с другими дисциплинами.

Прежде чем приступить к рассмотрению данного вопроса остановимся на понятии:

- ГИДРОЛОГИЯ – наука, изучающая гидросферу, ее свойства и протекающие в ней процессы и явления во взаимосвязи с атмосферой, литосферой и биосферой.

В соответствии с разделением вод земного шара на две группы, гидрология делится на:

1. Океанологию (гидрология морей и океанов)
2. Гидрологию вод и суши.

В свою очередь в гидрологии суши можно выделить:

1. ИНЖЕНЕРНУЮ ГИДРОЛОГИЮ – разрабатывающую методы гидрологических расчетов и прогнозов.

«ГИДРОМЕТРИЯ» представляет собой раздел гидрологии суши.

Указание на предмет гидрометрии заключено в самом ее названии, образованном от двух греческих слов, которые в переводе означают «вода» и «измеряю».

Современная гидрометрия, определяется как измерительная часть гидрологии, изучающая методы наблюдения за режимом водных объ-

ектов, движением воды и наносов, применяемые при этом устройства и приборы, а также способы обработки результатов измерений.

В задачу гидрометрии входят определения: уровней; глубин; рельефа дна и свободной поверхности потока; скоростей и направления течений жидкости; расходов воды; расхода и стока наносов; элементов термического и ледового режимов потоков.

К водным объектам, которые рассматривает гидрометрия, в общем случае относятся реки, каналы, озера и водохранилища.

### **Краткая история развития**

Первые гидрологические исследования рек Беларуси начались в начале 18 столетия, когда начали осваиваться водные пути и строиться судоходные каналы. В основном они проводились на реках Днепр, Березина, Припять, Западная Двина, Неман, Западный Буг, В 1876 г. были начаты стационарные гидрологические наблюдения в Бобруйске, Мозыре, Могилеве, Гродно, Витебске, Слониме, Белице, Столбцах, Мостах., Орше, Жлобине, Лоеве, Борисове.

Современные наблюдения за гидрологическим режимом рек и водоемов проводятся на 136 постах (122 речных и 14 озерных) и 2 болотных створах. Посты располагаются по всей территории Беларуси на больших, средних и малых реках, на наиболее значительных озерах и водохранилищах, имеющих научные и рекреационные значение озерах Нарочь, Лукомское, Освейское, Чигиринское.

### **I.2. Водный баланс земного шара и речных бассейнов**

**Круговорот воды** – это есть постоянный обмен влагой между гидросферой, атмосферой и земной поверхностью, состоящий из процессов испарения, переноса водного пара в атмосфере, конденсации его в атмосфере, выпадении осадков и стока.

1. Испарение: с поверхности земного шара в среднем за год составляет 577 тыс. км<sup>3</sup> воды: Из этого объема воды:

- а) 505 тыс. км<sup>3</sup> – испарение с мирового океана;
- б) на поверхность суши – 47 тыс. км<sup>3</sup>.

А теперь перейдем к определению водного баланса – это соотношение прихода и расхода воды с учетом изменения ее запасов за выбранный интервал времени для рассматриваемого объекта.

Обычный водный баланс описывается уравнением водного баланса – определенным математическим выражением.

1) Уравнение водного баланса для земного шара имеет следующий вид

$$X_0 + X_c = E_0 + E_c, \quad (2.1)$$

где  $X_0$  и  $X_c$  – соответственно средние годовые осадки выпавшие на поверхность океанов и суши; мм.

А сейчас перейдем к рассмотрению

2) уравнения водного баланса для речного бассейна.

**Речным бассейном** называют водосбор реки (или речной системы) и вся толща почвогрунтов, с которой вода поступает в реку.

Бассейн каждой реки включает поверхностный и подземный водосборы:

а) *Поверхностный водосбор* представляет собой участок земной поверхности, с которой вода поступает в данную речную систему.

б) *Подземный водосбор* – это часть толщи почвогрунтов из которых вода поступает в речную сеть.

Следует отметить, что поверхностный водосбор может не совпадать с подземным. Однако из-за больших трудностей в определении границы подземного водосбора его несовпадение с новым не учитывается. Границы подземного водосбора, как мы уже отмечали определить трудно, а границы поверхностного водосбора определяются достаточно точно водораздельной линией по карте с горизонталями.

*Водораздельная линия* речного бассейна представляет собой географическую границу между смежными водосборами. Она проходит по наиболее возвышенным точкам смежных водосборов.

Для больших речных бассейнов уравнение водного бала за год запишется в виде

$$X = Y + E \pm И, \quad (2.2)$$

где  $X$  – количество выпавших осадков в речном бассейне;

$Y$  – речной сток с бассейна;

$E$  – испарение с поверхности бассейна;

$И$  – изменение запасов влаги в бассейне. (возрастание или убывание снежного покрова, запасы воды в озерах, болотах и поймах рек, накопление и расходование грунтовых и почвенных вод).

### 1.3. Водные ресурсы и влияние на них антропогенной деятельности

*Водными ресурсами* – называют запасы поверхностных и подземных вод какой либо территории.

К водным ресурсам относят все воды гидросферы: т.е. рек, озер, каналов, водохранилищ, подземные воды, почвенная влага, водяные пары атмосферы, ледники.

#### 2.1. Водные ресурсы земного шара.

Общие запасы воды на Земле составляют  $W = 1386 \times 10^6 \text{ км}^3$  (включая и мировой океан)

- пресных вод  $\approx 35 \times 10^6 \text{ км}^3$ , т.е.  $\approx 2,5 \%$
- речные воды  $\approx 0,006 \%$  от общих запасов пресных вод
- грунтовые воды по количеству занимают 2-е место
- воды озер – 3-е место.

#### 2.2. Водные ресурсы бывшего СССР.

а) Суммарный сток рек РФ и бывших союзных республик в средний по водности год составляет  $4740 \text{ км}^3/\text{год}$ , или десятую часть суммарного стока земного шара.

По объему возобновляемых водных ресурсов бывший СССР занимал второе место в мире, уступая Бразилии. Удельная водообеспеченность ниже Бразилии –  $200 \text{ тыс. м}^3/\text{в год с км}^2$ .

б) Эксплуатационные ресурсы пресных подземных вод составляет  $320 \text{ км}^3/\text{год}$  (могут изыматься из водоносных пластов без ущерба)

в) подземный сток с территории бывшего СССР равен  $1100 \text{ км}^3/\text{год}$ .

Водные ресурсы распространяются чрезвычайно неравномерно по территории, во времени (как внутри года, так и в многолетнем разрезе).

а) основная доля годового стока  $\approx 60 \%$  приходится на 2...3 весенних месяца, а в южных районах доля весеннего стока  $> 75 \%$  от годового.

#### 2.3. Водные ресурсы Республики Беларусь

В средний по водности год на территории РБ:

- а) выпадает  $146 \text{ км}^3$  осадков;
- б) стекает в виде речного стока –  $36,4 \text{ км}^3$ ; из них – поверхностный –  $23,3 \text{ км}^3$ ; подземный сток –  $13,1 \text{ км}^3$ ;
- в) испаряется –  $110 \text{ км}^3$  воды.

Суммарный речной сток с учетом транзитных вод поступающих из соседних территорий в средний по водности год равен 57,1 км<sup>3</sup>:

- в многоводные годы достигает 96 км<sup>3</sup>;
- в маловодные – 39 км<sup>3</sup>

По данным (ЦНИИКИВР).

2.4. *Хозяйственная деятельность человека при использовании водных ресурсов* оказывает большое влияние на количественные и качественные объектов и их гидрологический режим.

Антропогенные изменения водности рек могут быть значительными. К главным антропогенным факторам, воздействующих на водные ресурсы относят:

- регулирование стока рек с помощью водохранилищ;
- орошение и осушение земель;
- агротехнические мероприятия;
- коммунальное и промышленное водопотребление;
- урбанизация (рост городов, покрытие асфальтом, перевод малых рек и ручьев в подземные коллектора, засыпка русел, ликвидация оврагов, строительство городских прудов, канализационных систем и т.д.) короче все то, что нарушает естественный режим стока.

На водные ресурсы влияет:

1) Антропогенное изменение климата вызванного искусственным изменением химического состава атмосферного воздуха. Наибольшее влияние оказывает углекислый газ СО<sub>2</sub>, который усиливает «парниковый эффект» в атмосфере, пропуская коротковолновую радиацию и задерживая длинноволновое излучение. Увеличение СО<sub>2</sub> за счет сжигания ... приводит к глобальному потеплению атмосферы, которое оказывает влияние на распространение осадков, а значит и сток.

2) *2-й фактор.* Забор воды из рек бывшего СССР составляет 300...350 км<sup>3</sup>/год. Общие безвозвратные потери на 1990г. составляли 166 км<sup>3</sup>/год. Они образуются в основном в районах орошаемого земледелия и являются главной причиной уменьшения естественного стока:

На 1990г. эти потери:

- для р.Дон – 27 %; Днепр – 28 %; Кубани – > 25 %, а сток р.р.Амударья и Сырдарья оказался практически полностью израсходованным.

3) Поступление в водоемы биогенных веществ и превышение ПДК других химических соединений, соединений азота, фосфора, стимулирует массовое размножение водорослей, т.е. происходит «самозагряз-

нение» водоемов. Концентрация вредных веществ превышает в 100 и 1000 раз ПДК.

4) В результате хозяйственного водопользования и резкого изменения речного стока в южных районах произошло катастрофическое снижение уровней и ухудшение водно-солевого баланса крупных водоемов – Арала, Балхаш, Иссык-Куля, Каспийского моря.

Примеры:

а) проблема Аральского моря, обреченного на полное высыхание:

– до 1960 шло наполнение водами Сырдарьи и Амударьи.  $V = 56 \text{ км}^3/\text{год}$ ;  $F = 66 \text{ тыс. км}^2$  при зеркале отменяющих 53 м БС (обеспеченность судоходство, лов рыбы, ондатроводство, животноводство на прифермских землях). составил несколько  $\text{км}^3/\text{год}$ ;

– После 1960г. – уровень моря упал на 13...14 м.

площадь зеркала  $F_{\text{зеркала}} < \text{на } 1/3$  (сократилась);

соленость увеличилась в 2,5 раза,

наблюдающееся опустынивание и засоление земель.

б) Проблема Каспийского моря сильно обострилась в конце 70-х годов в связи с падением уровня моря до критичной отметки 29,0 мБС. Многолетнее падение уровня моря было вызвано увеличением безвозвратного водозабора в бассейне моря и сокращении притока речных вод на 13 %.

1) первым шагом было – перекрытие пролива Кара-Богаз-Гол, который испарял 5...10  $\text{км}^3/\text{год}$ . Перекрыт в 1977г глухой плотиной и практически обсох. Это угрожало засолению окрестных почв и опустыниванию прилегающих территорий (перенос ветром солей с пов-ти залива).

2) В 1984г в плотине устроено водопропускное сооружение для подачи воды в залив  $\approx 2 \text{ км}^3/\text{год}$ .

3) В 1988г – началось повышение уровня моря за счет увеличения на 10 % притока в море и уменьшения на 10 % испарения сего пов-ти под влиянием климатических факторов. К 1992г повышение достигло – 1,8 м.

4) Повышение не стоит называть положительным, ибо ущерб от него в связи с освоением и застройкой осушенной за 10 лет зоны весьма велики.

#### **1.4. Гидрографические характеристики речного бассейна**

*Речные бассейны характеризуются:*

- а) физико-географическими и  
 б) морфометрическими характеристиками.  
 а) к *физико-географическим характеристикам* относят: географическое положение, климатические условия, рельеф водосбора и т.д., а также геологическое строение, степень залесенности, озерность бассейна, выраженная зависимостями

$$f_{л} = F_{л}/F ; \quad f_{03} = F_{03}/F ; \quad f_{6} = F_{6}/F ; \quad (3.1)$$

где  $F_{л}$ ,  $F_{03}$ ,  $F_{6}$  – соответственно площади, занятые лесами, озерами, болотами в пределах бассейна, км<sup>2</sup>.

$F$  – площадь речного бассейна, км<sup>2</sup>.

Эти коэффициенты выражаются в % или долях от 1.

б) к *морфометрическим характеристикам бассейнов* относятся параметры формы речного водосбора

Речной бассейн имеет в плане сложную форму, очерчиваемую водораздельной линией.

1. *Коэффициентом развития водораздельной линии* называют отношение длины водораздельной (рис.4.1) линии  $L_{в}$ , к длине окружности круга  $L$ , площадь которого равна площади речного бассейна.  $F = F_{6}$ . После преобразований получаем

$$K_{в} = 0,28 \frac{L_{в}}{\sqrt{F}} \quad (3.2)$$

Коэффициент  $K_{в}$  для бассейнов рек на территории Европы находящихся в пределах  $K_{в} = 1,3 \dots 2,6$ ;

Рис. 4.1

4. В качестве морфометрического параметра может быть исполнено отношение площади бассейна  $F$  к его длине  $L$  (безразмерное отношение)

$$K_{6с} = \sqrt{F/L}$$

$K_{6с} \approx 0,35$  – для больших рек.

$K_{6с} \approx 0,35$  – для небольших рек при  $F < 250$  км<sup>2</sup>

### 1.5. Речная долина, русло и пойма реки.

*Речными долинами* называются неширокие, вытянутые в длину извилистые углубления в земной поверхности, характеризующиеся общим уклоном ложа.

Речные долины при встрече никогда не пересекаются, а сливаются вместе, образуя одну общую долину. В зависимости от происхождения долин их подразделяют на:

- а) тектонические
- б) вулканические
- в) ледниковые
- г) эрозионные

По форме поперечного профиля различают долины каньоны, ущелья, трапецевидные, корытообразные:

В долинах с широким дном могут образовываться речные террасы (счет террас обычно ведут от русла реки).

– *Террасы* являются формами рельефа долин часто в виде сравнительно горизонтальных участков на склонах долины.

– *Пойменная терраса* – это дно поймы реки.

– *Речным руслом* называют выработанное речным потоком ложе по которому происходит сток до выхода на пойму.

– *Поймой* называют часть речной долины, сложенной наносами и и периодически затапливаемой в половодье и паводки.

Границы русла четко определяются берегами и бровками русла (прирусловыми валами). Дно русла реки по грунтовому составу более однородное и плавное чем пойма. Для поймы характерны травяной покров, кустарники, лес. Рельеф имеет более резкие очертания.

Различают две основные формы сопряжения речных потоков с морем:

1. **Дельты** – многоорукавное русло, формирующееся в собственных отложениях при впадении в море. Это происходит в том случае, когда река трансформирует большое количество наносов, которые откладываются непосредственно перед впадением в море. Следовательно, многоорукавное русло формируется в собственных отложениях.

2. При малом содержании наносов и приливных явлениях сопряжение реки с морем носит название **эстуарием** – это когда река впадает в море одним расширенным, размытым руслом.

Речная система состоит из *главной реки и притоков*, которые в свою очередь, также имеют притоки. Реки, впадающие в главную реку,

называют притоками первого порядка, а впадающие в приток первого порядка называют притоками второго порядка и т.д.

К количественной характеристике речной сети относят:

*Густота речной сети* это длина речной сети приходящаяся на единицу площади какой либо территории (площади речного бассейна).

$$K_r = \frac{\sum \ell}{F} \quad (5.1)$$

где  $\frac{\sum \ell}{F}$  – длина всех водотоков, км;

F – площадь бассейна, км<sup>2</sup>.

В равнинных условиях русла практически всех рек в плане извилистые. Степень извилистости русла характеризуется коэффициентом извилистости русла

$$K_{из} = L_{из} / L \quad (5.2)$$

где  $L_{из}$  – длина реки на рассматриваемом участке, с учетом извилистости км;

L – длина прямой соединяющей устье и исток реки (определять по плану), км;

Длина реки отсчитывается от истока вниз по течению по линии наибольших глубин.

Положение этой линии определяет **фарватер**, по которому осуществляется судоходство.

При анализе формирования русел исполняет понятие:

*Динамическая ось потока* – линия на плане реки, в каждой точке которой скорость течения воды имеет наибольшее значение в живых сечениях.

*Стрежень потока* – линия, соединяющая точки с наибольшей поверхностной скоростью течения в живых сечениях потока.

Если  $V_{max}$  наблюдается на поверхности воды, то динамическая ось потока и стрежень совпадают.

## 1.5. Плесы и перекаты

Участок извилистого речного русла между двумя смежными точками перегиба его осевой линии называют **излучиной реки**.

Русловые деформации происходят в том случае, если русло сложено из наносов в которых преобладают илистые фракции.

*Меандрирование русла* – это плановое изменение положения русла в течении времени. (это есть плановые деформации речных излучин, возникающих в результате взаимодействия руслового потока с пойменным).

**ПЛЕСАМИ и ПЕРЕКАТАМИ** называют закономерное чередование глубоких и мелких участков потока по длине русла (рис.2)

**Перека́т** – характерных для равных рек форма донного рельефа, сложенная наносами обычно в виде широкой гряды, пересекающей русло под углом к общему направлению течения.

**Плесом** – называют глубоководный участок реки, находящийся между перекатами.

Плеса располагаются у вогнутых берегов (происходит размыв дна и берега и перемещения продуктов размыва вниз по течению).

**Побочными** называют отмели, образованные в результате отложения наносов у выпуклых берегов с некоторым смещением вниз по течению.

Чем больше кривизна излучины, тем больше глубина плеса.

Таким образом извилистость рек и образование плесов и перекаатов тесно связаны с поперечной циркуляцией в потоке, в результате которой размывается вогнутый берег, а продукты размыва (наносы) откладываются на выпуклом берегу.

## 1.7. ПОПЕРЕЧНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ

Поперечные уклоны воды появляются на изгибах рек под воздействием центробежных сил и сил, вызываемых вращением Земли (Корполисово ускорение).

Направление поперечной циркуляции согласуется с направлением поворота реки.

а) Если поток поворачивает вправо то циркуляция направлена против часовой стрелки. при повороте русла влево по течению поперечная циркуляция будет направлена по часовой стрелке.

Таким образом, в северном полушарии воздействие течения на правый берег рек (которые текут на север) будет больше, чем на левый, как на прямых участках, так и на закруглениях. Поэтому реки в северном полушарии обычно перемещаются в пойме вправо по течению.

Отсюда вытекает так называемый закон Бэра, суть которого состоит в том, что в северном полушарии правый берег реки высокий, а левый пологий.

Главной причиной возникновения поперечной циркуляции является:

а) перекося повторности воды в поперечном сечении реки на закруглениях;

б) неравномерное распределение скоростей по глубине воды (рис.7.1.)

Верхние слои воды, испытывающие большие центробежные силы,  $\left( f_{ц} = \frac{mV^2}{r_k} \right)$  где

$V$  – скорость частицы,  $m$  – масса частицы,  $r_k$  – радиус кривизны, движутся в сторону вогнутого берега и при этом вытесняют нижние слои воды, которые обладают меньшей центробежной силой; возникает замкнутое движение в полном сечении потока, т.е. поперечная циркуляция.

Поперечная циркуляция, складываясь с продольным движением воды вдоль реки, придает потоку винтообразный характер.

Поперечная циркуляция, играет большую роль в транспортировании наносов и формировании речных русел.

## **Лекция 2: ПИТАНИЕ И ВОДНЫЙ РЕЖИМ РЕК. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА**

2.1. Типы питания и фазы водного режима рек.

2.2. Классификация рек по типу водного питания и внутригодового распределения стока.

2.3. Основные фазы формирования нового стока при выпадении дождя и таянии снега.

2.4. Склоновое и русловое добегание.

2.5. Изохронны. Генетическая формула стока.

### **2.1. Типы питания и фазы водного режима рек**

Как правило питание рек происходит:

- 1) поверхностными и
- 2) подземными водами.

I. Поверхностное питание, в свою очередь, подразделяются на:

- а) снеговое;
- б) дождевое;
- в) ледниковое.

а) *снеговое питание рек* обусловлено таянием снега весной накопившегося в течении зимы. Для большинства равнинных рек Европейской части бывшего СССР сто весеннего половодья составляет > 50 % суммарного годового стока.

В реках Северного Казахстана и южных степных районах Европейской части бывшего СССР сток за счет таяния снега достигнут 90...95 %

б) *Дождевое питание рек* происходит за счет обильных дождей и ливней.

Дождевое питание, в особенности ливневое отличается значками колебаниями в течении всего года. Обложные дожди могут захватить большие площади и обеспечить сток в более или менее продолжительный период времени. Ливни же, распространяются на небольшие площади и имеющие малую продолжительность вызывает значение, но кратковременное повышение стока.

Реки с преобладающим дождеванием питанием находящихся в Закавказье (Колхидская низменность), в северной части Черноморского побережья, в Крыму и Восточной Сибири.

в) *Ледниковое питание* – сток от таяния льда и вечных снегов в высокогорных районах. Наибольший ледниковый сток наблюдается в самые жаркие месяцы; в это время наблюдаются заметные подъемы уровня воды днем и снижение их ночью. Реки ледниковым питанием находятся на Кавказе, Алтае, а также в Средней Азии.

**II. Питание рек подземными водами** наиболее устойчиво и равномерно в течение всего года. Подземное питание в той или иной мере имеют почти все реки, например у Волги оно составляет  $\approx 30\%$ . На некоторых малых реках оно составляет  $\approx 60\%$ . В районах вечной мерзлоты подземное питание ограничено и имеет место снеговое питание.

В зависимости от условий питания в режиме рек бывшего СССР выдает следствие характерные фазы: половодье, паводки и межень.

1. *Половодье* – фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды. Оно вызывается на равнинных реках снеготаянием (ве-

сеннее половодье), на высокогорных – таянием снега и ледников (летнее половодье), в муссонных и тропических зонах – выпадении летних, затяжных дождей (летнее половодье на реках Дальнего Востока).

2. *Паводок* – фаза водного режима реки, которая может многократно повторяться в различные сезоны года, характеризуется интенсивным, обычно кратковременным, увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями и снеготаянием во время оттепелей.

3. *Межень* – фаза водного режима реки ежегодно повторяющаяся в одни и те же сезоны, характеризующаяся малой водностью, длительным стоянием низкого уровня и возникающая вследствие уменьшения питания реки.

К летней (летне-осенней) межени относят период от конца половодья, до осенних паводков, а при их отсутствии – до начала зимнего периода т.е. до возникновения на реках ледовых явлений.

Летняя межень может быть устойчивой и продолжительной, а также прерывистой (периодически нарушаемой дождями).

Зимняя межень совпадает обычно с периодом ледостава. Расходы воды от начала замерзания рек постепенно снижаются, достигая минимума перед вскрытием.

## **2.2. Классификация рек по типу водного питания и внутригодового распределения стока.**

Распределение стока рек в различные периоды года неравномерно. На распределение стока в первую очередь влияют:

– климатические факторы – осадки и температура воздуха. На распределение стока влияют также размер бассейна, его рельеф, геологическое строение, наличие лесов, болот, озер, хозяйственная деятельность человека. Климатические факторы имеют географическую зональность. Поэтому различные источники питания средних рек в том или ином районе имеют постоянное соотношение, а форма гидрографа является устойчивой для различных рек.

На этом принципе основаны различные классификации рек, которые отражают распределение годового стока.

Первая климатическая классификация рек земного шара принадлежит известному климатологу А.И.Воейкову (1884г). В основу этой классификации положено время наступления основного половодья в соответствии с распределением источников питания, а характер изменения водности в течение года не учитывался.

Впоследствии советские исследователи (Б.Д. Зайков, М.И. Львович и др.) положили в основу характеристики внутригодового распределения стока гидрограф стока.

Все реки Советского Союза Б.Д. Зайков делит на 3 группы:

- а) с весенним половодьем;
- б) с половодьем в теплую часть года;
- в) с паводочным режимом.

Реки с весенним половодьем наиболее распространены в бывшем СССР.

а) В зависимости от характера половодья и размера стока реки этой группы делятся на пять типов: (с весенним половодьем);

б) Реки с половодьем в теплую часть года делятся на 2 типа.

1. **Казахстанский тип** – характеризуется очень высокой волной половодья и низким (до полного пересыхания) стоком в остаточную часть года. Сток дают исключительно зимние осадки, быстрое таяние которых вызывает высокие, но непродолжительное половодье.

2. **Восточноевропейский** – характеризуется высоким весенним половодьем, летней меженью, прерывистыми эпизодическими ливнями, низкой зимней меженью и повышенным осенним стоком. Некоторые реки этого типа имеют два максимума: первый (главный) – весной и второй – осенью.

3. **Западносибирский** – имеет небольшое растянутое половодье, повышенный летне-осенний сток и низкую зимнюю межень. Наличие в бассейнах рек этого типа болот, озер, обширно заливаемых пойм оказывает регулирующее влияние на сток.

4. **Восточносибирский** – характеризуется высоким половодьем, систематическими летне-осенними паводками и очень низким зимним стоком. Этот тип рек связан с обильными дождями летом и осенью и ограниченностью подземного питания.

5. **Алтайский** – отличается невысоким растянутым гребенчатовидным половодьем, повышенным летне-осенним и низким зимним стоком. Это обуславливается характером таяния снега в горах, постепенным продвижением области снеготаяния из долин на возвышенные места. На снеговое половодье накладываются дождевые паводки. Устойчивый зимний сток обусловлен запасом подземных вод.

6. **Дальневосточный** – имеет растянутое, гребенчатовидное половодье и низкий сток в холодное полугодие (зимних осадков мало). Подземное питание ограничено вследствие наличия вечной мерзлоты.

**7. Тяньшанский** – распространен в горах Средней Азии, Большого Кавказа и Камчатки, отличающийся от предыдущего более высоким зимним стоком. Питание рек ледниковое.

в) Реки с паводочным режимом в зависимости от характера распределения паводков в течение года делится на 3 типа: (рис.2.1)

**8. Причерноморский** – характеризуется паводочным режимом в течение всего года. Основным источником питания – дожди. Частично питание происходит за счет снега, выпавшего в горах и быстро растаившего.

**9. Крымский** – отличается от предыдущего низким стоком летнего сезона.

**10. Северокавказский** – распространен в восточной части северного склона Большого Кавказа, характеризуется паводками в теплое время и устойчивой меженью в холодное (подземное питание незначительно).

### **2.3. Основные фазы формирования поверхностного стока при выпадении дождя и таяния снега**

Явление паводкового стока, по Н.Е. Долтову состоит из 4-х фаз:

#### **I. Выпадение дождя**

1) *Первая (начальная) фаза* при выпадении дождя характеризуется отсутствием поверхностного стока. (все выпавшие осадки идут на:

а) заполнение углублений и неровностей почвы – поверхностная аккумуляция;

б) просачивание в почву – инфильтрация;

в) часть осадков задерживаются на ветвях, листьях, стеблях растений.

– Эта фаза – фаза полного бассейнового задержания. Продолжительность ее обозначим  $\tau_1$ .

2) *Вторая фаза* – продолжается от начала появления первых струек поверхностного стока до подхода струй к рассматриваемому створу. Эта вторая фаза начало поверхностного стока – фаза подъема продолжительностью  $\tau_2$ . В этот период вода поглощается почвой.

3) *Третья фаза* (продолжительность  $\tau_3$  – полного стока при стекании дождевой воды со всей площади бассейна. Поглощение воды почвой постепенно уменьшается. Эта фаза заканчивается в момент прекращения дождей.

4) *Четвертая фаза* (спад стока продолжительностью  $t_4$  – после прекращения дождя до окончания стока.

Так можно представить схему формирования стока при условии одинаковой за время дождя его интенсивности  $i$  и равномерного распределения по площади.

**Пример:**

а) По исследованию Н.Е. Долгова, поверхностный сток в южных районах Украины образуется при  $i > 0,5$  мм/мин и слое выпавших осадков  $h > 15$  мм.

б) При выпадении осадков их потери на смачивание почвы, растительности, заполнение углублений –  $h = 15 \dots 20$  мм.

в) Потери на испарение малы по сравнению с просачиванием воды в грунт.

**II Процесс формирования поверхностного стока при таянии снега** – аналогичен рассмотренному;

а) В первые моменты таяния снега вся вода задерживается в самом снеге или в неровностях и углублениях бассейна. т.е. наблюдается первоначальная бессточная фаза.

Наличие промерзшего слоя грунта или ледяной корки в значительной мере уменьшает просачивание.

В отличие от дождей наибольшее просачивание наблюдается в конце снеготаяния, а не в начале.

б) Неравномерное залегание снега обуславливает во времени площади снеготаяния. Сначала снег тает на открытых местах или южных склонах возвышенностей;

– затем в глубоких понижениях рельефа. и наконец;

– в зарослях кустарника и леса.

Таким образом, при выпадении дождей или таянии снега в формировании поверхностного стока принимает участие только некоторая часть атмосферных осадков. Эти осадки (дождевые или снеговые) называются эффективными, или стокообразующими.

Суммарная величина потерь атмосферных осадков при их стекании по поверхности бассейна выражаются коэффициентом стока

$$\eta = \frac{h}{x}$$

где –  $h$  – высота слоя стока, мм;

$x$  – высота слоя выпавших осадков, мм

## 2.4. Склоновое и русловое добегание

Атмосферные воды по поверхности бассейна стекают в виде мельчайших извилистых ручейков. По этим ручейкам вода течет по склону в понижение части рельефа – ложины, ложбины, логи, а затем в более крупные притоки – ручьи и малые реки.

Процесс добегания воды играет существенную роль в формировании поверхностного стока. Здесь происходит сложение у замыкающего створа частных расходов воды с разливах частей бассейна.

Различают:

а) склоновое (поперечное) добегание по склонам первичной гидрографической сети;

б) русловое добегание (продольное) – по гидрографической сети.

Склоны в бассейнах рек являются первичными площадями формирования поверхностного стока. Здесь нет установившихся твердо путей стока. Длина путей склонового добегания небольшая, чаще не превышает сотен метров.

Длина руслового добегания выражается сотнями и тысячами км.

а) мельчайшая гидрологическая сеть составляет 85...95 % всей площади бассейна;

б) 5...15 % от бассейна относится к главной реке и притокам.

Из мельчайшей сети сток попадает в более крупную сеть, значительно увеличивая расходы в ней.

После прекращения дождя или таяния снега стекание на поверхности бассейна – склоновое добегание – заканчивается в относительно короткий срок.

## 2.5. Изохронны. Генетическая формула стока.

А теперь дадим определение:

– Временем добегания воды называют время в течении которого водная масса проходит расстояние от определенных точек водосбора до замыкающего створа.

В данном случае имеется в виду время добегания воды с различных частей бассейна до замыкающего створа.

– *Изохронами* – называют линии на карте, соединяющие точки на водосборе с одинаковым временем  $\tau$  добегания воды до замыкающего створа N (рис.5.1)

Любая частица воды, находящаяся на площади, ограниченной первой изохронной  $\tau_1$ , имеет одинаковое время добегания.

Частица воды, находящаяся в любой точке площади ограниченной второй изохронной  $\tau_2$ , имеет уже другое время добегания и т.д.

Положение изохрон не может быть постоянным: по мере изменения скоростей добегания изохроны должны менять свое положение. Это в первую очередь зависит от фазы стока: подъем, максимум, спад или полное прекращение стока.

Поэтому изохронны можно представить только как изолинии, отвечающие каким-то осредненным значениям скоростей добегания.

Рассмотрим, как будут формироваться расходы в замыкающем створе:

1. Предположим, что продолжительность подачи воды на водосбор  $t_b = 3$  сут.

2. Время добегания воды от наиболее удаленной точки водосбора до замыкающего створа  $\tau_{max} = 5$  сут.

3. Спустя 1 сутки после начала водоподачи к замыкающему створу стечет вода с 1-й частной площади  $f_1$ , а величина стока будет:

$$Q_1 = h_1 \cdot f_1 \quad (5.1)$$

4. По истечении 2-х суток добежит до створа сток со второй части площади  $f_2$ , при величине слоя водоотдачи, которая была еще в первом интервале  $h_1$ , т.е.  $h_1 \cdot f_2$ , одновременно через створ будет проходить сток с первой частной площади  $f_1$ , при слое водоотдачи, соответствующей второму

$$Q_2 = h_1 \cdot f_2 + h_2 \cdot f_1, \quad (5.2)$$

5. К концу 3-х суток сток будет проходить уже с трех частных площадей  $f_1, f_2, f_3$ , и расход в замыкающем створе

$$Q_3 = h_1 \cdot f_3 + h_2 \cdot f_2 + h_3 \cdot f_1 \quad (5.3)$$

6. По истечении 3-х суток подача воды в бассейн прекратится, т.к.  $t_b = 3$  сут. Поэтому к концу четвертого интервала времени сток будет приходить с частных площадей  $f_4, f_3, f_2$  и его величина в замыкающем створе составит

$$Q = h_1 \cdot f_4 + h_2 \cdot f_3 + h_3 \cdot f_2 \quad (5.4)$$

7. Аналогично для последующих интервалов времени расходы воды в замыкающем створе будут соответственно равны

$$Q_5 = h_1 \cdot f_5 + h_2 \cdot f_4 + h_3 \cdot f_3, \quad (5.5)$$

$$Q_6 = h_2 \cdot f_6 + h_3 \cdot f_4, \quad (5.6)$$

$$Q_7 = h_3 \cdot f_5 \quad (5.7)$$

Таким образом, продолжительность стока в данном случае составила 7 суток, наибольшее количество площадей, участвующих в формировании расходов оказалось равным трем, т.е. времени водоотдачи.

В общем случае выражение расхода для любого интервала времени можно записать

$$Q_i = h_1 \cdot f_i + h_2 \cdot f_{i-1} + h_3 \cdot f_{i-2} + \dots + h_i \cdot f_i = \sum_{n=1}^{n=i} h_{i-n+1} \cdot f_n \quad (5.8)$$

Зависимость (5.8), выражающая закономерность стока воды с водосбора к замыкающему створу называется *генетической формулой стока*.

В общем случае продолжительность стекания равна

$$T = \tau_{\max} + t_B - 1$$

Для нашего примера имеем

$$T = 5 \text{ сут.} + 3 - 1 = 7 \text{ сут.}$$

### **Лекция 3. СТАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТОВ СТОКА**

- 3.1. Расчетные гидрологические характеристики.
- 3.2. Кривые распределения гидрологических характеристик.
- 3.3. Понятие обеспеченности. Эмпирическая кривая обеспеченности.
- 3.4. Аналитическая (теоретическая кривая обеспеченности).

### 3.1. Расчетные гидрологические характеристики

При проектировании строительстве и эксплуатации различных водохозяйственных объектов в целях эффективного использования и охраны водных ресурсов рек требуется знать возможные значения характеристик речного стока в период будущей эксплуатации этих объектов.

К числу основных гидрологических характеристик, количественно отражающих гидрологический режим реки и являющихся расчетными относятся: Среднегодовые, максимальные и минимальные расходы, распределение стока внутри года.

Из-за их многофакторной природы стока, прогноз будущих характеристик стока дается в вероятностной форме, без указания конкретных календарных сроков их появления. Практически эта задача решается с помощью «кривых распределения вероятностей».

Основным источником информации о количественных параметрах многолетних колебаний речного стока служат ряды гидрометрических наблюдений за этими характеристиками.

#### РАЗЛИЧАЮТ:

1. Расчетные характеристики речного стока при наличии многолетних данных. В изучаемом пункте реки их определяют в результате статистической обработки. При этом необходимо, чтобы состав наблюдаемых значений характеристик был однородным.

2. Когда ряд гидрометрических изменений в изучаемом пункте короткий. В этом случае параметры режима стока приводят к многолетнему периоду или однородным условиям.

С этой целью используют данные наблюдений по другим пунктам на той же реке (пунктам–аналогам) или по другим рекам (рекам–аналогам),

а) имеющие продолжительные ряды

б) измерений и расположенным в гидрологически сходных с изучаемым пунктам районах.

3. При отсутствии данных наблюдений в изучаемом пункте расчетные характеристики находят с помощью различных форм обобщения результатов, полученных по многолетним гидрометрическим измерениям на реках – аналогах.

Общим для всех методов определения характеристик речного стока является то, что они основываются на статистической обработке и

обобщении многолетних рядов гидрометрических измерений на изучаемой реке или на реках-аналогах.

### 3.2. Кривые распределения гидрологических характеристик

Предположим имеются наблюдения над какой-либо переменной величиной, например над годовым стоком  $Q_i$  за  $N$  лет. Выразим эти данные через:

а) модульные коэффициенты стока

$$K_i = \frac{Q_i}{Q} \quad (2.1)$$

где  $Q$  – норма стока,

б) рассмотрим эти члены ряда не в календарной последовательности, в порядке убывания, т.е.  $Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3$  и т.д.  $\geq Q_N$ ;

в) если данный ряд разбить на одинаковые интервалы по величине стока ( $\Delta K$ ) и определить частоту повторения его значений в каждом интервале ( $n_1; n_2; n_3 \dots n_N$ ); то можно построить ступенчатый график распределения частоты (вероятности) – такой график в математической статистике называется *гистограммой распределения*, а в гидрологии - *график повторяемости или частоты*.

1. Центр распределения - соответствует средней арифметической ряда  $Q_0$ ;

2. Медиана - делит ряд на 2 равные части;

3. Мода - представляет значение члена ряда  $C_{n_{\max}}$ ;

Кривые распределения бывают симметричные и асимметричные.

Гидрологические явления обычно характеризуются асимметричным распределением. Распределение годового, максимального и минимального стока имеют положительную асимметрию (лежат левее центральной ординаты).

Основные статистические параметры кривой могут быть определены различными методами: по методу моментов при достаточно длительном наблюдении  $p > 30$  лет.

Их мы в основном рассмотрим на практических занятиях ( $\sigma_Q; C_v; \sigma_{cv}; C_s; \sigma_{cs}$  и т.д.). Рассмотрим лишь норму стока  $Q$ /

1. а) Под нормой стока  $Q$  понимается среднее значение стока за многолетний период такой продолжительности, при увеличении ко-

торой полученное значение не меняется, т.е. находится в пределах допустимой погрешности.

б) Если среднее значение определяется за коротким ряд наблюдений, то его называют средней многолетней величиной –  $Q_0$ , но не нормой. В дальнейшем будем считать, что имеем большой ряд наблюдений, тогда  $Q = Q_0$ .

$$Q_v = \frac{1}{n} (Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n) = \sum_{i=1}^n Q_i / n \quad (2.2)$$

2. Коэффициент вариации (изменчивости)  $C_v$ , характеризующий изменчивости статистического ряда ( $n = 3$ )

$$C_v = \frac{\sigma}{Q}; C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

3. Среднее квадратическое от  $\sigma_Q = \frac{100C_v}{\sqrt{n}}$  отклонение (при  $n = 30$ ) (вероятная ошибка)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2}{n-1}} \quad (2.4)$$

4. Служат величины  $\sigma_Q$  и  $\sigma_{C_v}$  вероятных ошибок. Критерием достоверности в определении нормы стока ( $Q$ ) и коэффициента вариации ( $C_v$ )

Если выполняются данные условия (2.5 и 2.6), то ряд гидрологических величин считается длинным.

$$\sigma_Q = \frac{100C_v}{\sqrt{n}} \leq 10 \% \text{ ошибка нормы стока} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{C_v} = 100 \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} \leq 15 \% \text{ ошибка коэффициента вариации} \quad (2.6)$$

5. Коэффициент асимметрии  $C_s$ , характеризующий распределение случайных значений  $Q_i$  относительно нормы  $Q$  ( $n > 100$  лет)

$$C_s = \frac{1 \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{n \cdot C_v^3} \quad (2.7)$$

Ошибка коэффициента асимметрии

$$\sigma_{Q_s} = \frac{100}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n} (1 + 6C_v^2 + 5C_v^4)}; \quad (2.8)$$

Из-за большой ошибки для рядов с относительно малым числом членов  $n = 25 \dots 50$  лет, величина  $C_s$  определяется подбором, где  $n$  – число членов ряда.

### **3.3. Понятие обеспеченности (вероятности превышения) гидрологической характеристики. Эмпирическая кривая обеспеченности.**

Обеспеченность (вероятность превышения) гидрологической характеристики - это есть вероятность того, что рассматриваемой значение гидрологической характеристики может быть превышено среди всех возможных ее значений.

В гидрологических расчетах обеспеченность выражается в долях от 1 и % обозначается  $P$ .

При небольшом числе наблюдений за стоком обеспеченность определяется по

а) формуле С.Н.Крицкого и М.Ф. Менкеля

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100, \% \quad (3.1)$$

где  $m$  - порядковый номер члена (ранжированного ряда, расположенного в порядке убывания),  $n$  - число членов ряда.

б) по формуле Н.Н.Чегодаева

$$H = \frac{m - 0,3}{n + 0,4} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Последовательность построения эмпирической кривой:

1) Для построения эмпирической кривой обеспеченности члены хронологического ряда наблюдений за стоком за  $n$  лет располагаются в порядке убывания  $Q_1 \geq Q_2 \geq Q_3 \geq \dots \geq Q_n$ , где  $m$  изменяется от 1 до  $n$ .  $m = 1..n$ ;

2) По формуле (3.1) или (3.2) определяют  $P_i$ .

3) Вычисляют для соответственных расходов  $Q_i \rightarrow K_i = Q_i / Q$

4) По значениям  $P_i$  и  $K_i$  строят график эмпирической кривой обеспеченности рассматриваемой гидрологической характеристики (например среднегодовых расходов воды) (рис. 3.1)

Как видно из рис. 3.1. эмпирическая кривая обеспеченности имеет точку перегиба при  $P = 50\%$  и  $K=1$ .

Для спрямления или выравнивания эмпирических кривых обеспечений применяют клетчатку вероятности, полилогорифмическая шкала.

Это облегчает графическую экстраполяцию кривой обеспеченности за пределы наблюдений, при необходимости определения расходов воды малой или большой обеспеченности.

### 3.4. Аналитическая (теоретическая) кривая обеспеченности

Ввиду малых рядов наблюдений за стоком, при построении эмпирической кривой обеспеченности, особенно слабо освещаются минимальные и максимальные расходы. Эти участки кривой обеспеченности являются наиболее важными в расчетах стока. Поэтому возникает необходимость построения теоретической кривой обеспеченности.

$P = 0,1$  - осн.  $1$  класс  $P = 0,01$  - повтор. Анализ, рис. 3.1 ГТС 1 кл.  $p = 1\%$  - осн.,

$P = 0,01\%$  - пов. мелиор.  $P =$

Теоретическую кривую обеспеченности гидрологических величин строят на основании математических кривых распределения. Наибольшее распространение в гидрологии получили:

а) Биноминальная кривая распределения (кривая Пирсона 111 типа);

б) Кривые трехпараметрического гамма-распределения разработанные С.Н.Крицким и М.Ф. Менкелем.

а) Биномиальная кривая распределения определяется тремя величинами  $Q$ ,  $C_v$ ,  $C_s$ .

Для построения аналитической биномиальной кривой обеспеченности используют таблицы Фомтера-Рыбкина при  $X_{cp} = 1$ , в которой приведены нормированные отклонения модульных коэффициентов  $K_p$  от единицы (т.е. среднего значения), выраженные в долях коэффициента вариации  $C_v$ , в зависимости от обеспеченности  $P$  при фиксированных коэффициентах асимметрии  $C_s$ .

$$\Phi_p = \frac{\kappa_p - 1}{C_v} \quad [4.с. 412...413] \quad (4.1)$$

Величина  $\Phi_p$  называется нормированным отклонением от средней ординаты биномиальной кривой обеспеченности (число Фостера).

Зная  $\Phi_p$  и  $C_v$  определяются модульные коэффициенты обеспеченности

$$K_p = \Phi_p \cdot C_s + 1 \quad (4.2)$$

$$\text{и расход: } Q_p = K_p \cdot Q \quad (4.3)$$

таким образом порядок определения ординат биномиальной кривой обеспеченности следующий:

1. Для заданного коэффициента асимметрии  $C_s$  и табл. выбирают  $\Phi_p$  для различных  $P$  от 0,01 до 99,9%.

2. Используя выражения (4.2) или (4.3) определит расчетные ординаты аналитической кривой обеспеченности  $Q_p$  или  $K_p$  и по ним строят эту кривую.

б) Трехпараметрическое гамма-распределение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля допускает любые соотношения  $C_s$ , и  $C_v$ ;

$C_s / C_v = 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 \dots 6$ , чем отличается от биномиальной кривой.

При  $C_s = 2 C_v$  уравнение трехпараметрического гамма-распределения совпадает с уравнением биномиальной кривой.

Для построения аналитической кривой по вышеизложенному методу служит серия таблиц для различного сочетания  $C_s / C_v$ . Ординаты кривой обеспеченности представлены в этих таблицах в виде модульных коэффициентов  $K_p$ .

Ординаты определяются следующим образом:

1. Выбирают таблицу с определением  $C_s / C_v$ .
2. Для заданного  $C_v$  вычисляют  $K_p$  для различных  $P_l$ .
3. Определяет абсолютные ординаты кривой обеспеченности.

$$\theta_p = K_p \cdot 0 \quad (4.4)$$

4. По вычисленным ординатам строят график аналитической кривой трехшарнирного гамма-распределения.

#### **Лекция 4. ГОДОВОЙ СТОК РЕК**

4.1. Определение расчетных гидрологических характеристик годового стока при наличии длительного периода наблюдений.

4.2. Определение расчетных гидрологических характеристик годового стока при коротком ряде наблюдений.

4.3. Определение характеристик годового стока при отсутствии гидрометрических данных.

4.4. Методы расчета внутригодового распределения стока (при наличии гидрометрических данных, при недостаточности и отсутствии гидрометрических данных).

##### **4.1. Определение расчетных гидрологических характеристик годового стока при наличии длительного периода наблюдений**

Данный расчет сводится к определению параметров теоретической кривой обеспеченности, т.е.  $Q$ ;  $C_v$ ,  $C_s$ .

Длительный период наблюдений будет в том случае, когда (1.1)  $< 10\%$ ;  $< 15\%$  (см. практич. занятия).

При этом расчет вышеуказанных параметров приводится по трем методам:

- 1) методу моментов;
  - 2) методу наибольшего правдоподобия;
  - 3) графоаналитическому методу.
- (практические занятия).

##### **4.2. Определение расчетных гидрологических характеристик годового стока при коротком ряде наблюдений**

В том случае, когда ошибки нормы стока (2.5) и коэффициента вариации (2.6) превышают указанные значения (1.1), гидрологический ряд считается коротким.

При наличии короткого ряда используется метод для определения  $C_v$ ;  $C_s$ ; гидрологической аналогии.

**Аналогами** называют реки, сток которых формируется в сходных условиях климата, рельефа гидрологических и геологических условий. Расчеты по методу аналогий можно выполнять следующими способами:

- а) графоаналитическим способом;
- б) способом линейной корреляции;
- в) путем удлинения ряда исследуемой реки.

Сущность этих способов в приведении коротких рядов наблюдений к длительным путем установления связи между годовым стоком в изучаемом бассейне (с коротким рядом наблюдений) и стоком в бассейне – аналоге с многолетними наблюдениями. (см. практич. занятия).

### **4.3. Определение характеристик годового стока при отсутствии гидрометрических наблюдений**

При отсутствии данных о гидрологических характеристиках стока  $Q$  и  $C_v$  годового стока для неизученных рек может определяться:

а) по эмпирическим районным зависимостям, связывающим значение  $C_v$  с определяющими факторами.

Норма годового стока определяется по формуле

$$Q = q F^{10}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.1)$$

где  $q$  – средний многолетний модуль стока, определяемый по карте изолиний, л/(с. км);

$F$  – водосборная площадь реки, км<sup>2</sup>;

В 1962 г. К. П. Воскресенский разработал обобщенную формулу для расчета  $C_v$  неизученных рек всей территории СССР.

$$C_v = \frac{A}{[q (F + 100)^{0.1}]^{-0.4}} \quad (3.2)$$

где  $A$  – параметр, определяемый обратным путем. Для СНГ  $A = 1 \dots 3$ .

В настоящее время при определении  $C_v$  для неизученных рек различают 3 случая:

а) при  $F < 1000$  км коэффициент  $C_v$  определяется по районным эмпирическим зависимостям типа

$$C_v = \frac{\alpha}{(F + 1)^n} \quad (3.3)$$

где  $A$  и  $n$  – эмпирические параметры, принимаемые по таблице;

б) при  $F = 1000 \dots 50000$  км и озерности 2...3% используется карта К.П. Воскресенского и др. авторов, последняя публикация которой была в 1986 г;

в) для рек с  $F > 50000$  км значение  $C_v$  определяется по аналогии с другими пунктами по расчетной реке или реке-аналогу.

Коэффициент **ассиметрии**  $C_s$  для неизученных рек устанавливается:

а) по соотношению с  $C_v$  по рекам-аналогам с наиболее длительным периодом;

б) при отсутствии аналогом принимаются следующие соотношения  $C_s/C_v$  (с учетом типа кривой обеспеченности);

1.  $C_s = 2C_v$  – для зоны избыточного и переменного увлажнения (от арктической до лесостепной и степной);

2.  $C_s = 1,5C_v$  – для эпизодическим пересыхающих рек (при наличии лет с отсутствием стока);

3.  $C_s = (1,5 \dots 1,8)C_v$  – для зоны недостаточного увлажнения (для пустынной и сухостепей);

4.  $C_s = 2,5C_v$  – в районах с частыми оттепелями в зимний период (Прибалтика) или интенсивными ливневыми осадками в теплый период (горные районы Кавказа, Средняя Азия, Приморье).

В целом по территории бывшего СССР  $C_s$  изменяется в больших пределах  $C_s = (0 \dots 3) C_v$ .

#### 4.4. Методы расчета внутригодового распределения стока

Расчет внутригодового распределения стока представляет собой количественную оценку распределения стока по сезонам года и месяцам, а также по декадам и неделям внутри месяца. Выражается обычно в % или долях от годового (при сезонном и месячном распределении).

Это позволяет иметь данные о стоке в конкретные (календарные) отрезки времени.

Таким образом, при расчетах внутригодового распределения стока необходимо решить две задачи:

- 1) установить соотношение стока за разные временные отрезки, и
- 2) его величину за эти периоды.

Сведения о внутригодовом распределении стока необходимы:

- при проектировании водохранилищ сезонного, месячного или декадного регулирования;
- для определения гарантированных минимальных или максимальных расходов воды;
- для оценки баланса и потребления воды.

Данные о внутригодовом распределении стока используются при разработке мероприятий:

- по борьбе с наводнениями;
- при осушении болот и заболоченных земель;
- при орошении;
- при разработке проектов промышленного и хозяйственного водоснабжения.

#### **4.1. Расчет внутригодового распределения стока при наличии гидрометрических данных**

Распределение стока по месяцам и сезонам меняется из года в год. Это происходит:

- 1) вследствие различных расходов воды в одинаковые фазы водного режима;
- 2) а также из-за сдвига времени наступления фаз водного режима в различные годы (пояснить).

В настоящее время наиболее широко в практике гидрологических расчетов применяются два метода расчета внутригодового распределения стока:

- а) метод компоновки;
- б) метод реального года.

Эти методы применяются при продолжительности периода наблюдений за стоком не менее 15 лет.

- а) **Метод компоновки.**

Для строительного проектирования на территории бывшего СССР за расчетный период принимается водохозяйственный год, который начинается с многоводного сезона.

В странах Восточной Европы чаще используется гидрологический год, начинающийся с ноября месяца.

Схема составления расчетов внутригодового распределения стока сводится к расчетам:

- межсезонного распределения стока;
- и внутри сезонного распределения стока.

Год делится на три сезона, из которых два маловодных или многоводных объединяются в один лимитируемый период, а внутри этого периода один из сезонов принимается за лимитирующий.

**Лимитирующий** – это критический период или сезон в отношении использования стока, то есть период, в котором создаются неблагоприятные условия работы водохозяйственной установки.

Для рек с весенним половодьем (РБ) три сезона следующие: весна; лето-осень; зима.

Лимитирующие периоды и сезон назначаются в зависимости от характера водопотребления и водопользования:

- при водопотреблении в целях водоснабжения и гидроэнергетики за лимитирующий сезон принимается самый маловодный;
- для орошения – за вегетационный период; – при проектировании отвода избыточных вод для борьбы с наводнениями – самый многоводный.

Для рек с весенним половодьем за лимитируемый период принимаются два смежных маловодных сезонов лето – осень и зима.

За лимитирующий сезон принимается один из трех сезонов.

Границы сезонов начинаются единым для всех лет с округлением до месяца.

Продолжительность многоводного периода следует назначать так, чтобы в принятых границах помещалось фактическое половодье за все годы как с наиболее ранним сроком его наступления, так и с наиболее поздним сроком окончания.

Выяснив границы сезонов, определяют сезонный сток путем суммирования в каждом году месячных расходов, соответствующих данному сезону.

Сток заданной обеспеченности

- а) для года;
- б) лимитирующего периода;

в) и сезона.

определяется по кривым обеспеченности, которые строятся так же, как и для годового стока (т.е. определяются  $Q$ ;  $C_v$ ,  $C_s$ ).

Расчетная обеспеченность назначается в соответствии с задачами водохозяйственного использования стока реки. Обычно она находится в пределах  $P = 75 \dots 97\%$ , хотя в отдельных случаях может составлять 50% и меньше.

#### **б) Метод реального года**

Внутригодовое распределение стока за конкретный (реальный) год наблюдений принимают в качестве расчетного стока за этот год и за лимитирующий период и сезон.

Расчеты этим методом выполняют в такой последовательности:

1) для всего ряда наблюдений определяют суммы месячных расходов за год, лимитирующий период и сезон, а также выбирают минимальный (для распределения маловодного года  $P = 75 \dots 95\%$ ) или максимальный (для многоводного года  $P = 10 \dots 25\%$ ) месячный расход;

2) полученные значения для каждой из этих характеристик располагают в порядке убывания, а рядом с ними выписывают водохозяйственные годы, к которым они относятся, и их обеспеченность вычисленную по формуле

$$P = \frac{m}{n+1} \cdot 100$$

3) из числа имеющихся лет выбирают год, в котором вероятности превышения для года, лимитирующего периода и сезона, а также минимального (или максимального) расхода близки друг к другу и отвечают задачам водохозяйственного использования;

4) отклонения обеспеченности  $P$  стока за расчетные интервалы конкретного выбранного года (реального года) от требуемой обеспеченности  $P$  не должны составлять более 20%. Для выбранного года устанавливается относительное распределение стока по месяцам (в % от годового стока);

5) расчетный годовой сток заданной обеспеченности  $P$ , % определяют по формуле

$$Q_p = K_P Q_{12}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.1)$$

где  $K_r$  – ордината кривой обеспеченности (модульный коэффициент в долях от единицы);

$Q$  – среднемноголетний годовой сток (норма),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$12$  – число месяцев в году.

Умножая расчетный годовой расход  $Q_r$  на %-ную долю каждого месяца, вычисляют расчетный расход каждого месяца  $Q_m$ , т.е. расчетный гидрограф.

Этот метод применяется при периоде наблюдений за стоком более 20 лет.

#### **4.2. Определение внутригодового распределения стока при недостаточности гидрометрических наблюдений**

При недостаточности ряда наблюдений расчет внутреннего распределения стока производится по

– методу гидрологической аналогии, т.е. по аналогии с внутригодовым распределением на изученной реке. Продолжительность наблюдений в пункте-аналоге должна превышать 20...25 лет, а на расчетной реке необходимо иметь не менее 1 года параллельных наблюдений.

Метод аналогии целесообразно применять на равнинных территориях при сравнительно-однообразных физико-географических условиях формирования стока. Требования к пункту-аналогу сохраняются те же, что и при расчетах годового стока. При этом необходимо обращать большое внимание на сходство: климатических условий, близость модулей стока, однородность условий формирования стока (факторы подстилающ. поверхности – рельеф, почвогрунты, гидрологические условия, озерность, заболоченность, залесенность), отсутствие большого различия в размерах площади бассейна.

При разработке особо важных проектов и полном отсутствии наблюдений в расчетном створе необходимо провести одновременные полевые обследования рассчитываемого водного объекта и реки-аналога (продолжительность половодья и дождевых паводков, высоты максимального подъема УВ, характер почво-грунтов и растительного покрова, наличия озер, болот, прудов, водохранилищ, заборов и сбросов воды), при этом ведутся одновременные гидрометрические наблюдения за стоком воды на расчетном пункте и пункте-аналоге в течение годового цикла.

#### 4.3. Расчет внутригодового распределения стока при отсутствии данных наблюдений

При относительно простых условиях формирования годового стока могут быть использованы в расчетах районные типовые схемы внутригодового распределения стока. Типовой гидрограф отражает общие черты распределения стока за ряд лет, исключая особенности отдельных лет.

Применяя районные схемы внутригодового распределения, следует убедиться, что в расчетном бассейне отсутствуют аномальные для данного района физико-географические условия (карст, озера и т.д.).

Типовые схемы распределения стока приводятся в РПВ СССР, а для Республики Беларусь согласно РПВ разработана часть II методических указаний (табл. 3.2) «Многолетние данные по климату РБ и расчетные гидрологические характеристики».

1) в соответствии с местоположением расчетного створа и озерностью по табл. 3.2. выбирают значения модульных коэффициентов месячных величин стока  $K_m$ ; % для расчетной обеспеченности  $P$ , %;

2) месячные расходы вычисляют по формуле

$$Q_m = 0,12 Q_p K_m, \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.2)$$

где  $Q_p$  – годовой сток заданной обеспеченности,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$K_m$  – %;

3) по полученным данным строят гидрограф стока.

Для оценки сезонного стока неизученных рек широкое применение получили методы: метод картирования в форме изолиний стока (который включает):

В 1966 г. в ГГИ была подготовлена

а) карта среднего слоя половодья и его коэффициента изменчивости  $C_v$ . При пользовании картами стока за период весеннего половодья необходимо учитывать зависимость слоя стока половодья от размеров площади бассейна, озерности, заболоченности и др., вводя соответствующие поправки;

б) карты стока за летне-осенний и зимний сезоны составлены Д. Л. Соколовским и уточнены В. Г. Андреяновым в 1957 году. Для определения обеспеченных значений сезонного стока по этим картам требовалось установить  $C_v$  и  $C_s$ .

По другому пути пошел А. М. Владимиров, опубликовавший в 1976 г.:

– карты изолиний стока лимитирующего и не лимитирующего сезонов (летне-осенний и зимний сезоны, дающие в сумме лимитирующий период) 75 %-ной обеспеченности. Для определения стока другой обеспеченности им разработаны переходные коэффициенты от стока 75-ной Р. Указанные карты дополняются картами минимального месячного стока в зимний и летне-осенний сезоны.

## **Лекция 5. МАКСИМАЛЬНЫЙ И МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК РЕК**

5.1. Факторы формирования половодий и дождевых паводков.

5.2. Определение расчетных максимальных расходов воды при наличии гидрометрических наблюдений.

5.3. Определение расчетных максимальных расходов талых вод при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

5.4. Построение расчетного гидрографа весеннего половодья при отсутствии данных наблюдений.

### **5.1. Факторы формирования половодий и дождевых паводков**

1.1. Основные факторы, влияющие на формирование весеннего половодья, - запасы воды в снегу и характер распределения его на площади водосбора, интенсивность и продолжительность снеготаяния, степень осеннего увлажнения и промерзания почвогрунтов.

Запас воды в снежном покрове обуславливается высотой и плотностью (Н и d), устанавливаемых путем полевых обследований. (См. лабораторную работу по метеорологии).

В процессе таяния снега наблюдаются три степени покрытия водосбора снегом:

– сплошной снежный покров, когда проталины занимают не более 5% площади водосбора;

– пестрый ландшафт, когда проталины занимают до 50% площади;

– отдельные пятна снега, когда проталины занимают от 50 до 97 % площади водосбора;

Продолжительность этих фаз снеготаяния зависит от дружности весны и характера рельефа, т.е. равномерности залегания снежного покрова и экспозиции склонов.

В процессе снеготаяния наибольший интерес представляет интенсивность и продолжительность. Они зависят от хода температуры воздуха и выпадения жидких осадков.

Необходимое для снеготаяния тепло поступает за счет прямой и рассеянной радиации, а также длинноволнового излучения атмосферы.

Сток талых вод на поверхности водосбора происходит с запозданием относительно начала снеготаяния. Снег обладает водоудерживающей способностью (влагоемкостью) – способностью удерживать воду в виде пленочной или капиллярной воды. Поэтому водоотдача из снега не равна интенсивности снеготаяния как по величине, так и по времени. Увеличению интенсивности водоотдачи способствуют дожди.

Факторы подстилающей поверхности определяют характер распределения снега на водосборе, аккумуляцию талой воды на его поверхности, инфильтрацию талых вод, скорости стекания и времени добегания по склонам и русловой сети, влияют на форму гидрографа половодья.

а) Рельеф поверхности водосбора влияет прежде всего на распределение снегозапасов и интенсивность снеготаяния.

б) Размеры, конфигурация и расчлененность водосбора влияют на скорость стекания и время добегания паводочных вод, а также на общую продолжительность половодья и форму гидрографа стока.

в) Озера и болота оказывают большое влияние на формирование стока половодья. Они являются основными аккумуляторами максимального стока. Поэтому на озерных и заболоченных водосборах наблюдается снижение максимального стока и увеличение продолжительности волны половодья. Такие реки имеют более низкий модуль максимального стока.

г) Почвогрунты бассейна, особенно карст оказывают существенное влияние на формирование стока половодья. В почвогрунтах аккумулируется часть талых вод и затем стекает в форме почвенного стока (верховодка) в периоды половодья.

В лесной зоне 40% стока половодья формируется в почвенно-грунтовой толще.

Карстовые породы обычно снижают максимальный сток, поглощая воды.

д) Влияние хозяйственной деятельности на максимальный сток сказывается главным образом при наличии на водосборе реки прудов и водохранилищ, при осушении болот и проведении комплекса агролесотехнических мероприятий (снегозадержание, насаждение лесных полос, противоэрозионные мероприятия, пахота поперек склонов и т.д.).

1.2. К основным факторам дождевого (ливневого) стока относятся: интенсивность дождя, его продолжительность и площадь, охватываемая ливневым дождем, инфильтрация воды в почву, добегание дождевых вод по русловой сети бассейна.

а) Ливни и ливневые дожди отличаются большой изменчивостью интенсивности во времени. Как мы уже с вами рассматривали ранее, в начальный период интенсивность дождя незначительная и почти вся вода расходуется на увлажнение почвы и заполнение неровностей рельефа. В формировании максимумов дождевых паводков основное значение имеет центральная часть ливневого дождя с наибольшей интенсивностью.

б) Второй важный фактор формирования ливневого стока – инфильтрация воды в почву. Потери дождевых осадков на инфильтрацию доходят до 70...80 % слоя осадков. Часть профильтровавшихся осадков уходит в глубокие водоносные слои и затрачивается на увлажнение почвогрунтов, а часть образует внутрпочвенный сток, т.е. принимает участие в формировании паводка.

в) Третий важнейший фактор, влияющий на формирование ливневых паводков, – добегание ливневых вод до русловой сети бассейна. Продолжительность поступления воды в русловую сеть при ливневом паводке значительно меньше, чем при снеговом половодье.

## **5.2. Определение расчетных максимальных расходов воды при наличии гидрометрических данных**

Одна из наиболее ответственных задач при проектировании различных ГТС – установление расчетных максимальных расходов воды, подлежащих пропуску через водопропускные и водосбросные отверстия.

Под максимальными расходами талых и дождевых вод понимают наибольшее значение мгновенных или срочных расходов во время прохождения весеннего половодья или дождевых паводков на реках и временных водотоках.

В настоящее время расчетные  $Q_{\max}$  определяют в соответствии со СН и П 2.01.14-83. В качестве критерия принимают обеспеченность  $P$  (табл 2.1).

Таблица 2.1. Ежегодная вероятность превышения (%) расчетных максимальных расходов.

Расчетные случаи	Класс гидротехнических сооружений			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Проверочный	0,01	0,1	0,5	1,0

Расчетные максимальные расходы талых вод при наличии гидрометрических данных находят с помощью аналитических кривых обеспеченностей. Для расчетов используют, как правило

а) кривую трехпараметрического гамма-распределения.

При достаточном обосновании допускается использовать б) биномиальную кривую обеспеченности (при  $C_s > 2C_v$ ).

Параметры указанных аналитических кривых  $Q$ ;  $C_v$ ;  $C_s$  – вычисляют в зависимости от принятого типа кривой распределения:

- методом моментов для биномиального и трехпараметрического гамма-распределения;
- методом наибольшего правдоподобия ( статистики и и по номограммам);
- графоаналитическим методом по трем опорным ординатам  $Q_{5\%}$ ;  $Q_{50\%}$ ;  $Q_{95\%}$ ;
- сглаженной эмпирической кривой обеспеченности максимальных расходов.

Коэффициент  $C_s$  макс-х  $Q_{\max}$  ввиду значительных случайных ошибок расчета этого параметра непосредственно по данным наблюдений в изучаемом пункте реки, определяют по среднему соотношению  $C_s/C_v$ , полученному для группы рек-аналогов с наиболее продолжительными рядами наблюдений за максимальными расходами в рассматриваемом гидрологическом районе.

По найденным параметрам  $Q$ ;  $C_v$ ;  $C_s$  строят аналитическую кривую  $P$  максимальных расходов и сопоставляют её с эмпирической кривой обеспеченности.

### 5.3. Определение расчетных максимальных расходов половодий при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

### 5.3.1. Расчет по методу СН и П.

При определении расчетных максимальных расходов при отсутствии данных гидрометрических наблюдений необходимо руководствоваться СН и П 2.01. 14-83. Эти нормы рекомендуется использовать при проектировании

а) ГТС на реках с площадями водосборов  $F < 20\,000$  км<sup>2</sup> в европейской части бывшего СССР.

б)  $F = 20\,000 \dots 50\,000$  км<sup>2</sup> – в азиатской части;

в) при других  $F$  для расчета необходимы материалы инженерно-гидрометеорологических изысканий.

Определение расчетных гидрологических характеристик (П 1 -98 к СН и П 2.01.14-83).

Расчетный максимальный расход воды весеннего половодья  $Q_p$ , заданный ежегодной вероятностью превышения  $P$ , % для равнинных и горных рек, определяется по формуле

$$Q_p = \frac{K_0 \cdot h_p \cdot \mu \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2}{(F + F_1)^{n_1}} \cdot F \quad (3.1)$$

где  $K_0$  – параметр, характеризующий дружность весеннего половодья;

Определяется по данным рек-аналогов обратным путем по формуле (3.1).

$h_p$  – расчетный слой суммарного весеннего стока ( без срезки грунтового питания), мм, ежегодной вероятностью превышения  $P$ , %, определяемой в зависимости от  $C_v$  и отношения  $C_s / C_v$ , а также среднего многолетнего слоя стока  $h$ , устанавливаемого по рекам- аналогам или интерполяцией;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов воды; принимается по табл.3.9 части II.

Коэффициент  $\delta$  учитывающий снижение максимального стока рек, зарегулированных водохранилищами, определяется с учетом проектных материалов и эксплуатационных данных.

Коэффициент  $\delta_1$ , учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесенных бассейнах, определяется по формуле

$$\delta_1 = \frac{\alpha}{(f_n + 1)^{n_1}}, \quad (3.5)$$

где  $n^1$  – коэффициент редуции, зависящий от места расположения леса на водосборе (для лесной зоны принять  $n^1 = 0,22$ );

$a$  – параметр, учитывающий расположение леса на водосборе, принимается по табл. 3.6 части II.

$f_n$  – залесенность водосбора, %.

При залесенности менее 3% или при проточной озерности более 20%  $\delta_1 = 1,0$ . Коэффициент  $\delta_2$ , учитывающий снижение максимального расхода воды заболоченных водосборов, определяется по формуле

$$\delta_2 = 1 - \beta \cdot \ell q (0,1f\delta + 1) \quad (3.3)$$

где  $\beta$  – коэффициент, учитывающий тип болот и преобладающий состав почвогрунтов вокруг болот и заболоченных земель; принимается по табл. 3.7 части II;

$f\delta$  – относительная площадь болот и заболоченных лесов и лугов на водосборе, %.

При заболоченности водосбора менее 3% или при проточной средневзвешенной озерности более 6,4 % коэффициент  $\delta_2$  принимается равным единице. Коэффициент  $\delta_3$ , учитывающий снижение максимального расхода воды вследствие распашки водосбора под сельхозугодья (реки с  $F < 200$  км ) принимаются по табл.3.8).

#### **5.4. Построение расчетного гидрографа весеннего половодья при отсутствии данных наблюдений**

Расчетным гидрографом называют расчетный график притока воды к сооружению.

Основными элементами расчетного гидрографа являются:

– расчетный максимальный расход воды заданной обеспеченности –  $Q_p$  %;

– объём стока половодья (паводка) –  $W_p$  %;

– общая продолжительность половодья –  $T$  ;

– продолжительность подъёма половодья –  $t_p$  ;

– продолжительность спада половодья –  $t_{сп}$  .

Расчетный гидрограф половодья необходим для решения вопросов связанных с расчетом и эксплуатацией гидротехнических сооружений.

Расчетные гидрографы строят по равнообеспеченным объемам половодья и максимальному расходу.

Ординаты типового гидрографа  $X_i$  и  $Y_i$  представляют собой закон, описывающий форму гидрографа в безразмерных координатах  $Y_i$  – относительные расходы;  $X_i$  – время.

Значение ординат типового гидрографа в виде  $X_i$  и  $Y_i$  приведены (табл. 3.14, ч. II) в зависимости от положения расчетного створа.

Коэффициенты формы гидрографа половодья  $\lambda$  принимаются по реке-аналогу при отсутствии гидрометрических данных. Приближенно можно принять  $\lambda$  модели гидрографа по (табл. 3.13, ч. II) в зависимости от положения расчетного створа.

Определив в п. 3.1. или 3.2. расчетные расходы половодья  $Q_p$  переходят к среднесуточному расходу по формуле

$$\bar{Q} = Q_p \cdot K_\tau \quad (4.1)$$

где  $K_\tau$  – коэффициент перехода, принимается по (табл. 3.12, ч. II).

Модуль суточного максимального стока определяется по зависимости

$$\bar{q}_p = \frac{\bar{Q}_p}{F}, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Км}^2) \quad (4.2)$$

Время подъема половодья определяется по формуле

$$t_n = \frac{0,0116 \cdot h_p \cdot \lambda}{\bar{q}_p}, \text{ сут} \quad (4.3)$$

$$h_p = K_p \cdot h_0 \quad (\text{см. расчеты п. 3.1 и 3.2})$$

Координаты расчетного гидрографа в виде средних суточных расходов  $Q_i$  и времени  $t_i$  в сутках от начала половодья вычисляют по соотношениям

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_p \cdot y_i \\ t_i &= t_n \cdot x_i \end{aligned} \quad (4.4)$$

Расчет ведется в табличной форме (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Расчет гидрографа весеннего половодья на р. Цна

обеспеченностью  $P = 5\%$

$X_i$	$Y_i$	$t_i$ , сут	$D_i$ , дата	$Q_i$ , м <sup>3</sup> /с
1	2	3	4	5

В табл. 3.15, ч. II приведена дата пика половодья  $D_0$  соответствующая моменту  $t_i = 1$  и  $Q_i = Q_p$ , которая позволяет перейти к конкретным датам (число, месяц). По данным граф 3 и 5 табл. 4.1 на миллиметровке строят гидрограф.

## Лекция 1. ЗАДАЧИ И ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

1.1. Понятие о регулировании стока и основные задачи водохозяйственных расчетов.

1.2. Классификация видов регулирования стока.

1.3. Расчетная обеспеченность отдачи при регулировании стока.

1.4. Назначение водохранилищ и их классификация.

1.5. Основные элементы водохранилищ с плотиной.

### 1.1. Понятие о регулировании стока и основные задачи водохозяйственных расчетов

А. Регулирование стока – это есть перераспределение во времени расходов воды в поверхностных водных потоках, т.е. искусственное увеличение или уменьшение этих расходов в отдельные моменты времени, по сравнению с естественными расходами.

Согласно (ГОСТ 19185-73. Гидротехника. Основные понятия).

Б. Под регулированием стока понимается – перераспределение во времени объема стока в соответствии с требованиями водопользования, а также в целях борьбы с наводнениями.

1. Естественный режим речного стока в большинстве случаев не соответствует режиму водопользования. Требования на воду различных отраслей народного хозяйства часто не совпадают между собой и с режимом естественного стока.

2. Для более полного и рационального использования водных ресурсов в целях бесперебойного и надежного обеспечения водой населения, промышленности и сельского хозяйства необходимо воздействовать на речной сток, т.е. регулировать его.

Регулирование стока достигается путем временного задержания воды в специальных искусственных водоемах (водохранилищах). В СНГ насчитывается = 2500 искусственных водохранилищ общим полным объемом.

У полн = 1200 км. куб.,

У плз = 500 км. куб.

В Республике Беларусь - 136 водохранилищ и примерно 850 прудов.

Все потребители воды делятся на две большие группы:

1. Водопользователи.

2. Водопотребители.

1. При водопользовании вода не изымается из водоисточника (рек, озер и т.д.) и не расходуется, а лишь используется для выполнения определенных функций.

2. При водопотреблении вода забирается из водных объектов, причем часть её теряется безвозвратно (инфильтрация, испарение), часть расходуется промышленностью и сельским хозяйством на производство продукции и др. цели.

Кроме того, при водопотреблении резко ухудшается качество той части воды, которая возвращается в реки и озера, - она загрязняется.

1. К водопользователям относят:

1. Энергетику – один из наиболее крупных потребителей воды для выработки электроэнергии. Режим работы ГЭС характеризуется суточной, недельной и сезонной неравномерностью.

2. Водный транспорт –

3. Лесосплав – предъявляются требования к обеспечению необходимой судоходной глубины и Скоростей. Режим водопользования сезонный лимитирующий период летняя межень.

4. Рыбное хозяйство – основное требование – необходимое качество воды для жизни и воспроизводства рыбы.

5. Рекреация – использование водотоков и водоёмов для спорта, отдыха, водного туризма. Отмечается большое антропогенное воздействие на качество воды.

## II. ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ:

1. Промышленное и коммунальное водоснабжение – удовлетворяет нужды промышленности и населения в воде. Коммунальное включает бани, прачечные, столовые и т.д..

2. Сельское хозяйство – вода расходуется на орошение и обводнение земель, водоснабжение. Главный потребитель – орошение, 80% воды теряется безвозвратно.

Основные задачи водохозяйственного расчета при регулировании стока включают:

1. Проектирование водохранилища в целом, с относящимися сюда водохозяйственными расчетами.

2. Проектирование сооружений, образующих водохранилище (плотины, водозаборные и водосбросные сооружения, подводящие и отводящие каналы и т.д.) – дается в курсе ГТС.

В настоящем курсе дается методика проектирования водохранилища в целом, перед которым стоят следующие основные задачи:

1.1. Установление зависимости между размерами водопотребления, или степенью регулирования стока и размерами необходимых водохранилищ.

1.2. Выбор типов и основных размеров сооружений образующих водохранилище ( $H_{пл}$ , УВ, расположение и размеры водовыпускных сооружений и т. д.).

1.3. Выяснение расчетного режима водохранилища и составление плана его использования.

1.4. Расчеты, на основе которых разрабатываются правила регулирования стока и эксплуатация водохранилищ.

Регулирование стока, как научная дисциплина опирается на гидрометрию, гидрологию, речную гидравлику, использует теорию вероятности, методы статистического анализа. Она тесно соприкасается с дисциплинами: рациональное использование водных ресурсов, ГТС с-х мелиорации, эксплуатация ГМС и др.

## **1.2. Классификация видов регулирования стока**

Существуют различные виды регулирования стока ( в зависимости от задач, характера и состава водопотребителей), которые классифицируют по трем основным признакам:

1. По назначению;
2. По продолжительности;
3. По степени использования стока.

I. По назначению водохранилища подразделяют на:

1. Запасные;
2. Задерживающие;

### 3. Комплексные.

1. Запасные – предназначены для повышения  $Q$  воды в маловодные периоды за счет сброски воды накопленной (в водохранилище) в многоводные сезоны или годы.

Это основной тип водохранилищ.

2. Задерживающие (противопаводковые)– предназначаются для борьбы с наводнениями и селевыми потоками.

3. Комплексные – они совмещают функции вышеуказанных водохранилищ.

II. По продолжительности различают:

1. Суточное регулирование – основная задача состоит в перераспределении в течение суток равномерного  $Q$  реки в соответствии с требованиями потребителей.

Вода накапливается в водохранилище в часы малого потребления и расходуется в часы повышенного потребления.

2. Недельное регулирование – заключается в перераспределении в течение недели равномерного стока с неравномерным потреблением.

Промышленные предприятия требуют большего количества воды в рабочие дни, а в выходные меньше. В выходные вода накапливается в водохранилище и покрывается нехватка в будние дни.

3. Сезонное (годовое) регулирование стока – позволяет перераспределять стоки в течение сезона или года. В период половодий водохранилище наполняется, а в период межени сбрасывается. Это наиболее распространенный вид регулирования стока (при водоснабжении, ГЭС, орошении и т.д.).

4. Многолетнее регулирование стока – заключается в перераспределении стока в течение длительного многолетнего периода. Цикл регулирования (наполнение – сброска) длится несколько лет.

III. По степени использования стока:

1. Полное регулирование – используется весь речной сток, т.е. весь сток задерживается в водохранилище. В НБ воду не сбрасывают.

2. При неполном регулировании – часть стока не используют и идет на сброс.

### **1.3. Расчетная обеспеченность отдачи при регулировании стока**

Расчетную обеспеченность отдачи – вероятное число лет в % -х от общего расчетного периода (гарантированная отдача обеспечена) – вычисляют вероятностным методом.

Расчетная обеспеченность отдачи зависит от параметров ВХС, правил водопользования и регулирования.

В формировании расчетной обеспеченности фактической отдачи участвуют сток, отдача, емкость водохранилища, потери воды. Между  $Y$  водохранилища, отдачей и  $P$  устанавливается определенная связь.

При повышении % обеспеченности отдачи и постоянном стоке необходимо увеличить емкость водохранилища.

Расчетная обеспеченность отдачи (нетто) характеризуется вероятностью ежегодного превышения расхода, т.е. числом лет, выраженным в % - х, в течении которых потребитель полностью и бесперебойно обеспечивается водой в условиях регулирования стока.

1. Годовая отдача при хозяйственно-бытовом водоснабжении должна быть бесперебойной и иметь приоритет перед другими потребителями.

Обеспеченность отдачи устанавливается для:

- питьевого водоснабжения  $P = 97...99\%$  ;
- промышленного -//-  $P = 95...97\%$  ;
- орошения -//-  $P = 75... 95\%$  ;
- ГЭС -//-  $P = 90...95\%$  ;
- водный транспорт --  $P = 80...90\%$  .

Отрасли водного хозяйства по степени бесперебойности отдачи делятся на 3 группы:

- не допускающие перерыва или уменьшения отдачи;
- не допускающие перерыва, но допускающие кратковременное снижение отдачи воды;
- допускающие кратковременный перерыв и уменьшение подачи воды;

Чем выше степень бесперебойности отдачи, тем больше %-т её обеспеченности.

#### **1.4. Назначение водохранилищ и их классификация**

Водохранилище – искусственный водоем, образованный водоподпорным сооружением на водотоке для хранения воды и регулирования стока.

Выделяют 5 основных типов водохранилищ: равнинные, предгорные, горные, озерные, наливные.

1. Равнинные водохранилища характеризуются:

- а). большой площадью поверхности воды;
- б).  $H_{\max} = 15 \dots 25$  м;  $H_{\text{ср}} = 5 \dots 9$  м;  $h_{\text{сраб}} = 2-7$  м.
- в). интенсивным процессом переработки берегов;
- г). имеют большую емкость и используются комплексно;
- д). большая площадь затоплений и подтоплений.

2. Предгорные водохранилища (плоскогорные):

$H = 70 \dots 100$  м;  $h_{\text{сраб}} = 10 \dots 20$  м; незначительные затопления и подтопления территорий.

3. Горные водохранилища:

$H \sim$  более 100 м;  $h_{\text{сраб}} = 100$  и более м. Затопление, подтопление, переработка берегов – незначительна. Поперечный профиль – узкий каньон. Русло слабоизвилистое без поймы.

3. Озерные водохранилища – создаются на реке вытекающей из озера, и подпор, вызванный плотиной, распространяется на озеро.

4. Наливные водохранилища – создаются путем заполнения естественных котловин и обвалования пониженных участков вблизи реки. Применяют их при орошении земель и строительстве ГАЭС.

Водохранилища классифицируют по площади водной поверхности (F) и (Y):

- а) крупные:  $F = 100 \dots 500$  км<sup>2</sup>;  $Y = 1 \dots 10$  км<sup>3</sup>.
- б) средние:  $F = 20 \dots 100$  км<sup>2</sup>;  $Y = 0.1 \dots 1.0$  км<sup>3</sup>;
- в) малые:  $F =$  менее 2 км<sup>2</sup>;  $Y =$  менее 0.01 км<sup>3</sup>.

Пруд – искусственный водоем небольших размеров и  $F$  менее 1 км<sup>2</sup>.

## 1.5 Основные элементы водохранилищ с плотиной

1. Мертвый объем (Y<sub>м.о.</sub>) – это постоянная часть полного объема водохранилища, которая в нормальных условиях эксплуатации не срабатывается и в регулировании стока не участвует.

УМО – проектный уровень максимальной технически допустимой сработки водохранилища предусмотренный расчетом регулирования стока в условиях нормальной эксплуатации.

2. Полезный объем (Y<sub>плз</sub>) – основной объем водохранилища, непосредственно используемый для регулирования стока и ограничен НПУ.

НПУ – максимальный проектный уровень ВБ, который может поддерживаться в нормальных условиях эксплуатации гидротехнических сооружений

$$Y_{\text{полн}} = Y_{\text{нпу}} = Y_{\text{м.о.}} + Y_{\text{плз}} \quad (5.1)$$

3. Форсированный объем ( $Y_{\text{ф}}$ ) – создается путем форсирования уровня воды в водохранилище НПУ в период половодий и паводков, чтобы предотвратить наводнения в НБ.

ФПУ – подпорный уровень выше НПУ, временно допустимый в ВБ в чрезвычайных условиях эксплуатации ГТС.

## **Лекция 2. ПОТЕРИ ВОДЫ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩА**

2.1. Потери воды на дополнительное испарение, вызванное устройством водохранилища

2.2. Учет потерь на фильтрацию. Мероприятия по борьбе с фильтрацией.

2.3. Потери воды на льдообразование.

2.4. Общая методика расчета полезной емкости водохранилища.

2.5. Типы задач и порядок водохозяйственного расчета при регулировании стока.

2.6. Понятие о тактности работы водохранилища. Различные сочетания стока и отдачи.

### **2.1. Потери воды на дополнительное испарение, вызванное устройством водохранилища.**

Испарение – это процесс превращения воды в пар.

В общем случае испарение происходит с поверхности воды, льда и снега, с поверхности почвы и растительного покрова. В результате строительства водохранилища часть суши затопливается, при этом меняется и характер испарения (его величина и режим). В зависимости от соотношения величины испарения с ложа строящегося водохранилища и с водной поверхности за безледоставный период могут иметь место три случая:

а) после создания водохранилища испарение может несколько уменьшиться ( если испарение с переувлажненной суши превышает испарение с водной поверхности );

$$E_{\text{в}} < E_{\text{с}} \quad (1.1)$$

б) оно может остаться без существенного изменения;

$$E_{\text{в}} \sim E_{\text{с}} \quad (1.2)$$

в) оно может увеличиться ( если испарение с поверхности воды выше, чем испарение с суши);

$$E_{\text{в}} > E_{\text{с}} \quad (1.3)$$

В водохозяйственной практике наиболее распространен последний случай. Полученная при этом прибавка «Ед» носит название «дополнительного испарения».

И так, до строительства водохранилища сток с затопляемой территории

$$U_{\text{с}} = X - E_{\text{с}}, \quad (1.4)$$

С той же территории после сооружения водохранилища сток составит

$$U_{\text{в}} = X - E_{\text{в}} \quad (1.5)$$

Тогда

$$E_{\text{д}} = U_{\text{с}} - U_{\text{в}} = E_{\text{в}} - E_{\text{с}}, \text{ мм}; \quad (1.6)$$

где:  $X$  – расчетный слой осадков, мм;

$E_{\text{в}}$  – расчетный слой испарения с водной поверхности, мм;

$E_{\text{с}}$  – расчетный слой с поверхности суши, мм ;

Сложности возникают при определении  $E_{\text{с}}$ : Наиболее часто её определяют с помощью карты среднегодового слоя испарения с суши.

А.В.Огиевский предложил для вычисления  $E_{\text{с}}$  приближенное соотношение

$$E_c = X(1 - \alpha c), \text{ мм, где } \alpha c = \frac{y}{x} - \text{коэффициент стока со склонов речной долины} \quad (1.7)$$

$$E_d = E_v - X(1 - \alpha c), \text{ мм} \quad (1.8)$$

С учетом обеспеченности по В.И. Мокляку

$$E_d = K_{100-p} \cdot E_v \cdot K_p \cdot X(1 - \alpha c), \text{ мм} \quad (1.9)$$

Расчетный слой испарения с водной поверхности  $E_v$  согласно «указаний» можно определять

$$E_v = 0,14 \text{ п} (L_0 - L_{200}) (1 + 0,72 U_{200}), \text{ мм} \quad (1.10)$$

где  $L_0$  – среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре поверхности почвы, Мб;

$L_{200}$  – средняя упругость водяного пара над водоемом на высоте 200 см, мб;

$U_{200}$  – средняя скорость ветра над водоемом на высоте 200 см, м/с;

$\text{п}$  – число дней в расчетном периоде.

$$E_v = E_0 \cdot K_n \cdot K_z \cdot K_l, \text{ мм} \quad (1.11)$$

Борьба с потерями на испарение:

- 1) обвалование мелководий;
- 2) посадка защитных лесных полос по берегам водохранилища;
- 3) устройство водохранилищ с отсеком в хвостовой части.

## 2.2. Учет потерь на фильтрацию

Причины – утечка воды из водохранилища через борта и дно, в обход плотины, под плотину и через конструкции плотины.

На величину утечек влияют:

- 1) гидрологические условия створа и чаши водохранилища;
- 2) конструкция плотины;
- 3) напор и ширина земляной плотины при НПУ;
- 4) переменность фильтрационных потерь во времени (кальма-таж).

Гидрогеологические условия:	За год	
	мм	%
1. благоприятные (водонепроницаемые породы, высокие УГВ)	0...50	5...10
2) средние	50...100	10...20
3) неблагоприятные (водопроницаемые породы, низкий УГВ)	100...200	20...40

Мероприятия по борьбе с фильтрацией:

- 1) покрытие ложа бетоном, глинобетоном, полимерной пленкой с пригрузкой;
- 2) нагнетание цементного раствора в трещины скалы;
- 3) искусственный кольматаж, за счет увеличения мутности воды поступающей в водохранилище.

### 2.3. Потери воды на льдообразование

Объем воды аккумулярованной во льду и снегу, осевшем на берегах водохранилища, во время его зимней сработки при отсутствии наблюдений определяется

$$Y_{\text{л}} = (\Omega_{\text{н}} - \Omega_{\text{к}}) (h_{\text{л}} \gamma_{\text{л}} K_{\text{л}} + P \cdot h_{\text{сн}}) \cdot 10^4; \quad (3.1)$$

где  $\Omega_{\text{н}}$ ,  $\Omega_{\text{к}}$  – начальная и конечная площади зеркала водохранилища при отметках уровня, соответствующих нижней поверхности льда, км<sup>2</sup>;

$h_{\text{л}}$ ,  $h_{\text{сн}}$  – максимальная толщина льда и средний слой снега, см;

$P$  – плотность льда и снега, г/см<sup>3</sup>;

$K_{\text{л}}$  – коэффициент постепенности нарастания льда за период сработки воды.

Объем воды во льду, осевшем на берегах, учитывают при сезонном регулировании стока, когда водохранилище ежегодно срабатывается до УМО.

### 2.4. Общая методика расчета полезной емкости

## водохранилища.

### 2.4.1. Типы задач и порядок водохозяйственного расчета при регулировании стока.

А. Типы задач решаемые при регулировании стока.

Основные параметры водохранилища (объем, отдача) и режим его работы независимо от вида регулирования стока устанавливаются на основании сопоставления и анализа расчетного стока и планового потребления (отдачи).

Применяемые методы расчета можно подразделить на 2 группы (способы):

#### 1-я группа

1). Расчет по фактическим календарным рядам полученным в результате длительных гидрометрических наблюдений и переносимые из прошлого в настоящее в том же порядке.

При этом решается, так называемая

а) прямая задача – определение полезной емкости при заданном притоке и потреблении, норме потерь и начальном наполнении.

б) и обратная задача – определение фактического потребления при заданной емкости и других условиях регулирования

#### 2-ая группа

Расчет на основании обобщенных характеристик стока ( $Q$ ;  $C_v$ ,  $C_s$  и в некоторых случаях коэффициента корреляции  $R$ ) т.к. речной сток есть случайный процесс к которому применимы методы математической статистики. При этом календарный ряд наблюдений используется для определения статистических параметров стока. Построенные на их базе кривые обеспеченности служат для получения вероятных значений стока и их сочетаний на основании которых устанавливают основные параметры регулирования стока (объем водохранилища, отдачи, дефициты и т.д.). Первый способ нагляден, но ограничен в применении при отсутствии длительных наблюдений. Второго наоборот.

Поэтому сочетают один способ со вторым.

## Б. ПОРЯДОК ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО РАСЧЕТА.

Уравнение водного баланса для интервала времени  $\Delta t$ :

$$Y = Q_p \cdot \Delta t - q \Delta t - (И+Ф) - Q_{сбр} \cdot \Delta t, \quad (4.1)$$

$Q_p$  – расчетный приток воды в водохранилище;

$q$  – конкретное водопотребление;

$Q_{сбр}$  – сбросный расход;

$I$  – потери на испарение;

$\Phi$  – потери на фильтрацию.

Исходя из этого уравнения (4.1) и намечается порядок водохозяйственного расчета ( т.е. расчет параметров водохранилища и режима его работы):

**ПРОВОДЯТСЯ**

а) гидрологические расчеты по установлению основных гидрологических характеристик;

б) установление объемов и режима водопользования и водопотребления;

в) установление потерь;

г) расчет нормативных подпорных уровней и объемов;

д) составление графиков работы;

е) экономические расчеты.

## **2.4. Понятие о тактности работы водохранилища.**

### **Различные сочетания стока и отдачи.**

Существует однократная, двухкратная, трех... и многократная работы водохранилища. Чаще всего в практике встречается двухкратная работа водохранилища. Она может быть независимая, зависимая, промежуточно-зависимым циклом (частный случай). Как определяется при этом  $V_{плз}$  и проводится регулирование по I и II вариантам было подробно рассмотрено на практических занятиях.

Пример.

Мес.	W	U	W - U		I вар		II вар	
			+	-	V	R	V	R
1	2	3	4	5	6	7	8	9
III	30	10	20		0		0	
IV	50	10	40		20		0	20
V	20	10	10				25	25

УІ-УІІІ	20	30					25	
ІХ-ХІ	35	30					15	
ХІІ-ІІ	10	30					20	
							0	

$$Y_1 > Y_2; Y_3 < Y_4; Y_3 < Y_2; Y_{\text{плз}} = Y_2 + Y_4 - Y_3 = 25 \text{ млн.м}^3.$$

### Лекция 3. ЗАИЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

3.1. Стогно-нагонные колебания уровней воды в водохранилищах и определение отметки гребня плотины.

3.2. Заиление водохранилищ. Факторы, определяющие заиление водохранилища по его отдельным зонам.

3.3. Расчет объёма и срока заиления водохранилища.

3.4. Расчет мертвого объёма и уровня мертвого объёма.

3.5. Мероприятия по уменьшению заиления водохранилищ и требования различных отраслей народного хозяйства к величине мертвого объёма.

#### 3.1. Стогно-нагонные колебания уровня воды в водохранилище и определение отметки гребня плотины.

На прошлой лекции был рассмотрен вопрос: нормативные уровни и емкости водохранилища.

Как известно в любом водохранилище возникают волны, которые приводят к колебаниям уровней воды, к образованию волновых течений.

Ветровые волны характеризуются:

- длиной –  $\lambda$
- высотой –  $h$ ;
- крутизной –  $h/\lambda$ ;
- пологостью –  $\lambda/h$ ;

Основными волнообразующими факторами являются: скорость, направление и продолжительность непрерывного ветра, размеры, конфигурация и глубина водоёма.

При определении элементов ветровых волн водоем делится на следующие зоны:

– глубоководную ( $h > 0,5 \bar{\lambda}_{2,l}$ );  $\bar{\lambda}_{2,l}$  – средняя длина ветровой волны, м;

– мелководную ( $0,5 \bar{\lambda}_{2,l} \geq h > h_{кр}$ );  $h_{кр}$  – критическая глубина, при которой происходит первое обрушение волн, м;

– прибойную ( $h_{кр} \geq h > h_{кп}$ );  $h_{кп}$  – критическая глубина, где происходит последнее обрушение волн, т.е. где начинается и заканчивается разрушение волн;

– приурезную ( $h < h_{rg}$ ); в пределах которой поток от разрушенных волн периодически накатывается на берег.

Для глубоководных зон дно не влияет на основные характеристики волн, для остальных – оказывает.

Для глубоководной зоны параметры волн определяются по графикам СН и П П –57 – 82 по двум безразмерным параметрам:

$$\frac{qt}{U_{10}} \quad \frac{qD}{U_{10}^2}$$

где  $U_{10}$  – расчетная максимальная скорость ветра на высоте 10 м над уровнем воды, м /с;

$D$  – длина разгона ветровой волны, м;

$t$  – продолжительность непрерывного действия ветра, с; ( $t = 6$  ч) при отсутствии данных.

При определении отметки гребня плотины с учетом сгонно-нагонных явлений используют следующие зависимости:

$$\text{– для нормальных условий} \quad H_c = H_{нпу} + h_{нг} + h_{нк} + a; \quad (1.1)$$

$$\text{– для чрезвычайных условий} \quad H_c = H_{нпу} + h_{ф} + h'_{не} + h'_{нк} \quad (1.2)$$

где:  $h_{нг}$  и  $h'_{не}$  – высота нагона волны соответственно при расчетной и средне многолетней скорости ветра, м;

$h_{нк}$  и  $h'_{нк}$  – накат ветровой волны на берега или откосы сооружений при тех же скоростях ветра, м;

$h_{ф}$  – слой фарсировки, м;

$a$  – запас высоты, который принимается в зависимости от класса капитальности сооружений, м;

а) Высоту нагона  $h_{нг}$  (перекоса свободной поверхности водоёма под действием ветра) при отсутствии данных определяют по формуле

$$h_{из} = 2 \cdot 10^6 \cdot \frac{U_{10}^2 \cdot D}{q \cdot h} \cdot \cos \alpha, \text{ м} \quad (1.3)$$

где  $h$  – глубина водоема в расчетной точке, м;  
 $\alpha$  – угол между продольной осью водоема и направлением ветра, град.

б). Приближенно высоту ветрового наката на откосы с  $1 < m < 5$  определяют по формуле Б.А.Пышкина

$$h_{нк} = 2 \cdot \frac{K_{ш}}{m} \cdot h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{\bar{\lambda}}{h_i}}, \text{ м} \quad (1.4)$$

где  $K_{ш}$  – коэффициент шероховатости откоса;  
 $\bar{\lambda}$  – средняя длина ветровой волны, м;  
 $m$  – коэффициент заложения откоса;  
 $h_i$  – расчетная высота ветровой волны, м;

### 3.2. Заиление водохранилищ. Факторы определяющие заиление водохранилища по его отдельным зонам

Наносы – твердые частицы переносимые потоком и формирующие русловые и пойменные отложения.

Наличие твердого стока обусловлено процессами механической (размыв поверхностными водами) и химической (грунтовыми водами) эрозии. На процесс формирования наносов в реках влияют: уклон, почвогрунты, распаханность, заболоченность, залесенность, рельеф, увлажнение на площади водосбора.

Режим наносов, который характеризуется перемещением в потоке, взаимодействием воды и русла – определяется гидравлическими элементами потока (величина и распределение скоростей, характеристики турбулентности). Поэтому транспорту наносов предшествуют гидравлические расчеты.

Основные факторы заиления:

1. Сток наносов;
2. Обрушение берегов;
3. Воздействие ветровых волн;
4. Структура и интенсивность транзитных течений.

1. Главнейшим является сток наносов, определяющий интенсивность заиления водохранилища, т.е. весь сток или только его часть аккумулируется в водохранилище.

Это выражается относительной емкостью водохранилища

$$\beta = \frac{V_{\text{инт}}}{W_0}, \quad (2.1)$$

где  $W_0$  – средне многолетний сток наносов, м

Поскольку все водохранилища работают со сбросами, режим наносов зависит от того, когда и какой продолжительности производятся сбросы (вариант регулирования).

А. На интенсивность заиления сказывается какие фракции преобладают в стоке наносов:

- на равнинных реках – преобладают взвешенные наносы (меньше заиляются);
- на горных реках – влекомые (больше заиляются);

Б. На интенсивность заиления влияет график работы водохранилища, т.е. режим наполнения приводит к поступлению наносов, а сброски приводят к размыву верхней части тела заиления и переотложению наносов в средней и даже приплотинной частях водохранилища.

Это явление используют при промывках и сбрасывают в НБ значительную часть наносов.

2. Важным фактором является обрушение берегов. На реках с высокими берегами и рыхлыми, легко размываемыми породами, поступление наносов весьма значительно.

3. Воздействие ветра, образование ветровых волн и течений приводит к смыву частиц в водоток.

4. Структура течений прежде всего связана с марфометрией (конфигурацией) водохранилища, а интенсивность транзитных течений с показателем водообмена.

### **2.3. Расчет объема и срока заиления водохранилища**

Различают срок заиления – продолжительность в годах заиления водохранилища до отметки НПУ при условии полного осаждения наносов (называют ещё условной заиляемостью)



воды) и расходом наносов в конечном створе, (т.е. работой сооружений и холостыми сбросами).

При этом необходимо иметь данные о мутности, расходах воды, параметрах водохранилища, плотности отложений.

$$\bar{V}_{нв} = \frac{1}{\rho_{омн}} \cdot (G_{в.н} - G_{в.к}) \cdot \Delta t \quad \text{— объем взвешенных наносов} \quad (3.6)$$

$$\bar{V}_{нц} = \frac{1}{\rho_{омн}} \cdot (G_{г.н} - G_{г.к}) \cdot \Delta t \quad \text{— объем влекомых наносов} \quad (3.7)$$

где  $G_{в.н}$ ;  $G_{в.к}$ ;  $G_{г.н}$ ;  $G_{г.к}$  — соответственно средние за принятый интервал расходы взвешенных и влекомых наносов в начальных и конечных створах водохранилища, кг/с;

$\Delta t$  — принятый интервал времени, с.

Эти расчеты выполняются по типовым гидрографам для соответствующего года, который делится на 3...4 расчетных интервала, для каждого из которых определяются средние расходы воды и наносов.

При приближенных расчетах годовой объем заилиения подсчитывается

$$\bar{V}_н = \frac{1}{\rho_{омн}} \cdot \rho_0 \cdot W_0 \cdot (1 + m - \delta), \quad (3.8)$$

где  $m$  — доля влекомых наносов в отложениях;

$\delta$  — доля взвешенных наносов, сбрасываемых в НБ транзитом

### 3.4. Расчет мертвого объема и уровня мертвого объема

Для прудов и малых водохранилищ с площадью водной поверхности 2...4 км<sup>2</sup> при отсутствии данных о режиме и гранулометрическом составе наносов расчет ведется на основании связи между относительной наносоудерживающей способностью и относительным объемом (см. расчетно-графическую работу).

Под наносоудерживающей способностью водоема понимают его способность удерживать соответствующую часть годового стока наносов.

$$\beta = \frac{V_{му}}{W_0}, \quad (4.1)$$

где  $W_0$  – среднегодовой объем стока реки,  $\text{м}^3$

$$\bar{P}_a = \frac{P_a}{P_\varepsilon}; \quad P_a = \bar{P}_a \cdot P_\varepsilon; \quad \text{годовое количество наносов в водохранилище, т/год.} \quad (4.2)$$

$$V_{н.в}^- = \frac{P_a}{P_{отл}} \cdot T, \quad \text{м}^3 \quad (4.3)$$

$$P_a = f(\beta) - \text{определяется по таблицам} \quad (4.4)$$

$$V_{м.о.} = V_{нв} + V_{нq} + V_{б}; \quad (4.5)$$

$$V_{н.г}^- = \frac{\beta}{P_{отл}} \cdot P_\varepsilon \cdot T, \quad \text{м}^3 \quad (4.6)$$

2. По формуле А.В. Караушева:

$$P_a = 1 - (1 - \beta) \cdot e^{-\frac{\varphi \cdot \beta}{1 - \beta}}, \quad (4.7)$$

где  $U$  – средняя гидравлическая крупность наносов,  $\text{м/с}$

$T$  – продолжительность периода сброса воды и наносов из водоема во время паводков,  $\text{с}$ .

#### **4.5. Мероприятия по уменьшению заиления водохранилищ и требования различных отраслей народного хозяйства к величине $V_{м.о.}$**

##### **1. Мероприятия по уменьшению заиления:**

1. Уменьшение и предотвращение ветровой и водной эрозии;
2. Сооружение в верховьях рек перед водохранилищем одной или нескольких емкостей для задержания наносов;
3. Устройство внерусловых наливных водохранилищ наполняемых и срабатываемых через обводные каналы. При этом половодья и паводочный сток пропускаются транзитом минуя водохранилище;
4. Проектирование гидроузлов с донными водовыпусками позволяющими производить промывку;

5. Каскадное размещение водохранилищ.

## II. Требования к величине мертвого объема.

1. Учет требований отраслей:

б) для судоходства отметка УМО должна обеспечивать необходимые судоходные глубины;

а) для ГЭС потеря напора не должна превышать 20...30 % от полного напора;

в) рыбное хозяйство – при сработке вся рыба скапливается в МО, поэтому его размеры должны обеспечивать пространство, корм и воздух.

г) орошение – самотеком должно обеспечивать поступление воды на поля в требуемом количестве.

$h_{cp} > 1,0$  м, что обеспечивает зимовку рыбы.

2. Санитарно-технические условия

$h_{cp} > 1,5...2,0$  м;

$L_{\Omega} < 35\%$  (заращение, развитие малярийного комара).

## Лекция № 4. ГРАФИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ РАСЧЕТА ВОДОХРАНИЛИЩ

4.1. Сокращенная суммарная кривая и её свойства.

4.2. Построение сокращенной и разностной суммарных кривых.

4.3. Графический расчет по сокращенной и разностных кривых.

4.4. Решение обратной задачи при сезонном регулировании стока.

4.5. Многолетнее регулирование стока, задачи расчета.

### 4.1. Сокращенная суммарная кривая и ее свойства

Возьмем гидрограф стока  $Q = + (t)$  и на этот график нанесем

расход  $Q_0 = f_1 (t)$

Далее от каждого расхода

$Q_i$  вычтем  $Q_0$  и полученную

разность проинтегрируем

или просуммируем. Откладывая

полученные ординаты в коор-

динатах  $W_c - t$  получим

сокращенную суммарную

кривую.

Переход к построению сокращенной суммарной кривой необходим, если полная суммарная кривая строится за длительный интервал времени, т.е. нужен большой размер чертежа и мелкий масштаб, что снижает точность и наглядность расчетов. Таким образом, при многолетнем регулировании стока переходят к сокращенным суммарным кривым.

### СВОЙСТВА СОКРАЩЕННОЙ СУММАРНОЙ КРИВОЙ

1. Если  $Q = \text{const}$ , то  $W_c$  - прямая линия,

При  $Q$  - ступенчатом гидрографе

$W_c$  - ломаная линия.

2. Так как на отдельных интервалах  $Q < Q_0$ , то  $W_c$  может не только подниматься (возрастать), но и опускаться.

Если  $Q > Q_0$  – поднимается.

3. Разность ординат двух точек сокращенной суммарной кривой

$$\begin{aligned}
 W_c(t) - W_c(t_2) &= \int_0^{t_3} (Q - Q_0) dt - \int_0^{t_0} (Q - Q_0) \cdot dt = \\
 &= \int_{t_2}^{t_3} Q \cdot dt - \int_{t_2}^{t_3} Q_0 \cdot dt = W(t_3) - W(t_2) - Q_0 \cdot (t_3 - t_2)
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

т.е. разность двух ординат сокращенной суммарной кривой равна стоку за соответствующий интервал времени, уменьшенному на величину объема воды, вычисленному за тот же интервал времени по постоянному расходу  $Q_0$ .

4. Из формулы (1.1.) следует, что

$\frac{dW}{dt} = Q - Q_0$ , т.е. тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной, проведенной к сокращенной кривой, выражает разность расходов  $Q - Q_0$ .

а) При  $Q = Q_0$   $\frac{dW}{dt} = 0$  сокращенная суммарная кривая имеет max или min;

б) При  $Q > Q_0$   $\frac{dW}{dt} > 0$  – тангенс угла наклона касательной + кривая имеет подъем;

в) При  $Q < Q_0$   $\frac{dW}{dt} < 0$  кривая направлена вниз.

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

Преобразуем уравнение сокращенной кривой

$$W_c(t) = \int_0^t (Q - Q_0) \cdot dt = \int_0^t Q \cdot dt - \int_0^t Q_0 \cdot dt = W(t) - W_0(t) \quad (1.2)$$

Для получения ординаты сокращенной суммарной кривой нужно от ординаты обычной суммарной кривой вычесть ординату суммарной прямой постоянного расхода  $Q_0$ . Т.е. сокращенную суммарную кривую можно рассматривать как ту же полную суммарную кривую но перестроенную таким образом, что линия потребления занимает горизонтальное положение, а прежняя ось  $t$  наклонена, т.е. это равносильно повороту на угол  $\alpha$  или сокращенную суммарную кривую ещё называют полной суммарной кривой, но в косоугольных координатах.

## 4.2. Построение сокращенной и разностной суммарных кривых

4.2.1. Что касается построения сокращенной суммарной кривой, то этот вопрос будет рассмотрен на практических занятиях.

4.2.2. Помимо сокращенной суммарной кривой есть ещё разностная суммарная кривая у которой за величину постоянного расхода  $Q_0$  принято потребление  $q$ .

$$W_r(t) = \int_0^t (Q - q) \cdot dt \approx \sum_1^i (Q_i - q_i) \cdot \Delta t_i = W(t) - U(t), \quad (2.1)$$

Из (2.1) следует, что ординаты разностной интегральной кривой представляют разность ординат полной интегральной кривой стока  $W(t)$  и полной интегральной кривой потребления  $U(t)$ . Разностная интегральная кривая не приходит на ось  $t$ .

#### 4.3. Графический расчет по сокращенной и разностной кривым (практические занятия)

#### 4.4. Решение обратной задачи при сезонном регулировании стока

Определяется фактическая отдача –  $U_f$  при заданных условиях:

- притоке в водохранилище –  $W$ ;
- плановой отдаче (если она не задана, то ей задаются –  $U_{пл}$ ;
- норме потерь –  $S$  ;
- начальном наполнении –  $V_n$  ;
- известной полезной емкости –  $V_{плз}$  ;

Все расчеты сводятся в таблицу:

Расчетный интервал	Начальное наполнение, $V_n$	Приток, $W$	План.отдача $U_{пл}$	Фиктивная наполн. $V_f$	Конечн. на-полн., $V_k$	Средний объем, $V_{ср}$	Норма потерь, $S$	Фиктив. наполн. с учетом потерь, $V_{ср}$	Конечн. наполн. с учетом потерь, $V_k$	Сброс воды, $R$	Дефицитн. отдача, $D$	Фактичн. отдача, $U$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IV												
V												
...												

Фиктивное наполнение определяется:

а) без потерь  $V_{\phi} = V_n + (W - U)$ ; Конечное наполнение ограничивается  $V_{плз}$  и  $V_m$

б) с учетом потерь  $V'_{\phi} = V_{\phi} - S$ ;  $V_{м.о} \leq V_k < V_{пл}$

$$V_{cp} = \frac{V_n + W_k}{2}$$

1) Если  $V'_{\phi} > V_{нпу}$ , то  $V'_k = V_{нпу}$  и величина сброса

$R = V'_{\phi} - V_{нпу}$ , фактическая отдача равна плановой  $U_{\phi} = U_{пл}$ .

2) Если  $V_{нпу} \geq V'_{\phi} > V_{умо}$ , то сбросы и дефициты отсутствуют

$$V'_k = V'_{\phi}$$

$$U_{\phi} = U_{пл}$$

3) Если а)  $V'_{\phi} < V_{умо}$

$$V'_k = V_{умо}$$

Дефицит отдачи  $D = V_{умо} - V'_{\phi}$

б) При отрицательных значениях фиктивного наполнения

$$V'_{\phi} < 0 \quad D = V_{умо} + V_{\phi};$$

$$U_{\phi} = U_{пл} - D$$

Таким образом, в хронологической последовательности по интервалам времени находят конечные наполнения, сбросы и фактические отдачи за период регулирования стока.

## **ЛЕКЦИЯ 5. МНОГОЛЕТНЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА. РАСЧЕТ МНОГОЛЕТНЕЙ И СЕЗОННОЙ ЕМКОСТЕЙ ВОДОХРАНИЛИЩА МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА.**

5.1. Многолетнее регулирование стока, порядок расчета.

5.2. Расчет многолетней емкости водохранилища с помощью сокращенной суммарной кривой.

5.3. Расчет сезонной емкости водохранилища многолетнего регулирования.

5.4. Расчет потерь и полезной отдачи при многолетнем регулировании

стока.

5.5. Расчет многолетней ёмкости по первому способу С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля.

### 5.1. Многолетнее регулирование стока, порядок расчета

Если регулирование стока в пределах года недостаточно для покрытия потребности в воде с заданной обеспеченно, т.е.  $W < U$ , то применяют многолетнее регулирование стока.

Многолетнее регулирование – это перераспределение стока в течение многолетнего периода.

При многолетнем регулировании потребность в воде в маловодные годы обеспечивается стоком этих лет и сработкой запасов воды в водохранилище, накопленных в многоводные годы.

$$V_{\text{плз}} = V_{\text{мн}} + V_{\text{сез}}; \quad \text{– при многолетнем регулировании} \quad (1.1)$$

$$V_{\text{полн}} = V_{\text{мн}} + V_{\text{сез}} + V_{\text{м.о}}; \quad \text{– полный объем} \quad (1.2)$$

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

Расчет ведется либо по непосредственным данным, либо по осредненным статистическим данным (при отсутствии наблюдений).

Порядок расчета (общий):

1.  $V_{\text{мн}}$  – рассчитывают по годовым объемам стока на различные величины потребления либо табличным, либо графическим способом;

2. Определяется  $V_{\text{сез}}$  (сезонная составляющая объема) (остановимся ниже)

3. Определяется  $V_{\text{полн}}$  по (1.2)

4. По  $V_{\text{полн}}$  определяются потери за весь период работы и отдельно средние за один год

$$U_{\text{нет}} = U_{\text{вч}} - S; \quad (1.3)$$

Расчеты ведутся в безразмерных коэффициентах:

$$K = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{W_i}{W_0} \quad \text{– модульный коэффициент стока} \quad (1.4)$$

$$\alpha = \frac{U_{\text{бп}}}{W_0} \quad \text{– отдача (коэффициент зарегулирования стока)} \quad (1.5)$$

$$\beta_{\text{ми}} = \frac{V_{\text{ми}}}{W_0}, \beta_{\text{сез}} = \frac{V_{\text{сез}}}{W_0} - \text{коэффициенты (ёмкости) объема} \\ \text{водохранилища} \quad (1.6)$$

где  $W$  – среднемноголетний объем стока, м.

## 5.2. Расчет многолетней емкости водохранилища с помощью сокращенной суммарной кривой

В данном случае многолетнюю составляющую полезного объема водохранилища удобнее определять с помощью сокращенной суммарной кривой. Расчеты выполняются в табл. 1

Табл.1 Сокращенная суммарная кривая

Годы	$W_i$	$K_i$	$K_i - 1$	$(\sum K_i - 1)$
1				
3				
15				

Из рассмотрения сокращенной суммарной кривой видим, что многоводные годы расположились в начале, а маловодные в конце периода.

1. Задаемся потреблением, пусть  $\alpha = 1$ , тогда в системе координат  $(\sum K_i - 1)$  получим, что  $\alpha - 1 = 1 - 1 = 0$ , т.е. касательную следует проводить параллельно оси  $t$ . И положение  $1 - 1$  соответствует случаю полного использования стока  $\beta_{\text{ми}} = W_1 - W_2$

2. Заставим касательные вращаться вокруг указанных вершин (4 и 12), это равносильно тому, что изменяем  $\alpha$ . Крайним положением касательных будет положение  $2 - 2$

$$\beta_{\text{ми}2} = W_1 - W_2 - n(1 - \alpha); \quad (2.1)$$

3. Значение  $\alpha$  определяем согласно фрагмента сокращенной суммарной кривой

$$W_3 - W_2 = n_1(1 - \alpha) \quad (2.1)$$

$$\alpha = 1 - \frac{W_3 - W_2}{n_1} \quad (2.2)$$

4) Рассмотрев аналогично положения касательных 3 – 3; 4 – 4; и т.д. можно построить график  $\beta_{\text{мн}} = f(\alpha)$  по которому в зависимости от коэффициента зарегулирования стока можно определить многолетнюю составляющую ёмкости водохранилища  $\beta_{\text{мн}}$  и  $V_{\text{мн}}$ .

### 5.3. Расчет сезонной емкости водохранилища многолетнего регулирования

При наличии в водохранилище (полностью или частично) многолетней емкости, сезонные нехватки воды будут покрываться за счет неё, снова пополняясь сезонными излишками. В конце маловодного периода или в самом начале наступающего затем многоводного периода, когда многолетний запас уже исчерпан, для выравнивания сезонных нехваток необходимо иметь дополнительно сезонную емкость ( $V_{\text{сез}}$ ).

Её расчет ведется с учетом следующих соображений:

1. Поскольку  $V_{\text{мн}}$  исчерпана, то для первого года после окончания маловодного периода годовой сток не может быть меньше  $\alpha$ . Поэтому предположим, что  $K = \alpha$ .

2. При назначении графика внутригодового распределения можно поступить двояко. Наиболее осторожно будет принять его по типу самого невыгодного года, что даст наибольшую величину  $V_{\text{сез}}$ . Однако трудно предположить, что за маловодным периодом последует год с наиболее невыгодным распределением стока. Можно ограничиться построением расчетного гидрографа по среднему по водности году.

Ввиду приблизительного характера расчета  $V_{\text{сез}}$ , принимаются более крупные интервалы чем месяц, т.е. год разбивается на 2-3 сезона резко отличающихся между собой.

Поскольку при расчете  $V_{\text{сез}}$  мы исходим из  $K = \alpha$ , то при каждом новом потреблении необходимо вновь рассчитывать  $V_{\text{сез}}$ .

Расчет  $V_{\text{сез}}$  можно упростить если определить сначала  $V_{\text{сез}}$  для среднего по водности года при  $K = \alpha = 1$  при этом найденная величина  $V_{\text{сез}}$  будет являться предельным  $V_{0 \text{ сез}}$  значением сезонной емкости;

2). При величинах потребления  $\alpha < 1$   $V_{\text{сез}} < V_{0 \text{ сез}}$ , величина которой определяется:

$$V_{\text{сез}} = V_{0 \text{ сез}} \cdot \alpha \quad (3.1)$$

$$V_{0 \text{ сез}} = \beta_{0 \text{ сез}} \cdot W_0 \quad (3.1)$$

$$\text{Из (3.2) } \beta_{0 \text{ сез}} = \frac{V_{0 \text{ сез}}}{W_0}, \quad V_{\text{сез}} = V_{0 \text{ сез}} \cdot \alpha_{\text{сез}} = \beta_{0 \text{ сез}} \cdot \alpha \cdot W_0 = \beta_{\text{сез}} \cdot W_0 \quad (3.3)$$

где  $\beta_{\text{сез}} = \beta_0$ , т.е. определив  $\beta_{0 \text{ сез}}$  все остальные  $\beta$  найдутся умножением их на  $\alpha$ .

$\beta_{0 \text{ сез}}$  в частности можно найти графическим способом имея интегральные кривые стока и отдачи.

#### **.4. Расчет потерь и полезной отдачи при многолетнем регулировании стока**

Есть два способа:

1. При наличии непосредственных данных.

Определив  $V_{\text{мн}}$ ,  $V_{\text{сез}}$ ,  $V_{\text{м.о}}$  можно составить график работы водохранилища по отдельным годам, по которому можно найти:

1.1. Средние объемы за каждый год ( $V_{\text{ср}}$ ), по которым в свою очередь можно найти

1.2. Средние площади зеркала  $\Omega_{\text{ср}}$  и зная нормы потерь  $E$  за каждый год отдельно, можно найти:

1.3. Суммарные потери за весь период и средние за один год ( $S$ )

1.4. Чистое потребление  $U_{\text{нет}} = U_{\text{бр}} - S$ ;

Способ точен, но требует большого объема вычислений.

II. Приближенный способ

2.1.  $V_{\text{max}} = V_{\text{мн}} + V_{\text{сез}} + V_{\text{м.о}}$ ,  $\beta_{\text{max}} = \beta_{\text{мн}} + \beta_{\text{сез}} + \beta_{\text{м.о}}$ ;

2.2.  $\beta_{\text{min}} = \beta_{\text{м.о}}$ ;

2.3.  $\beta_{\text{ср}} = \frac{\beta_{\text{мн}} + \beta_{\text{сез}}}{2} + \beta_{\text{м.о}}$ ,

2.4.  $V_{\text{ср}} = \beta_{\text{ср}} \cdot W_0$   $\Omega_{\text{ср}} = S$ ;

2.5.  $U_{\text{нет}} = U_{\text{бр}} - S$ ;

б) Строим график и для  $\alpha_{\text{расч}}$  определяем окончательно все параметры в такой последовательности  $U_{\text{бр}}$ ;  $S$ ;  $U_{\text{нет}}$ ;

#### **5.5. Расчет многолетней емкости по первому способу**

**С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля**

В 1930 году разработан этот способ.

В случае отсутствия гидрометрических данных используют осредненные статистические данные для расчета многолетнего регулирования стока.

1). Пусть известен сток реки за  $N$  лет в виде модульных коэффициентов, которые в хронологическом порядке располагаются

$$K_1; K_2; K_3; \dots; K_n \quad (C_v; C_s) \quad K_i = \frac{W_i}{W_0}; \quad (5.1)$$

2). Задавшись потреблением  $\alpha$  будем сравнивать модульные коэффициенты

$$K_i \text{ с } \alpha \quad \alpha = \frac{U_{бр}}{W_0}, \quad (5.2)$$

а) если  $K_i \geq \alpha$  – избыток;

б) если  $K_i < \alpha$  – недостаток (дефицит), который может быть покрыт из водохранилища

$$Z_i = \alpha - K_i, \quad (5.3)$$

Для удовлетворения потребления с заранее гарантированной обеспеченностью  $P$  вместо  $K_i$  берем  $K_p$ , тогда дефицит (недостаток)

$$Z_p = \alpha - K_p; \quad (5.4)$$

3) Чтобы гарантировать покрытие дефицита стока за два любые соседние года необходимо составить ряд фиктивных модульных коэффициентов в виде

$$K_1^{(2)} = \frac{K_1 + K_2}{2}; K_2^{(2)} = \frac{K_2 + K_3}{2}; \dots; K_{n-1}^{(2)} = \frac{K_{n-1} + K_n}{2}; (C_v^{(2)}, C_s^{(2)}), \quad (5.5)$$

следовательно:

$$Z_i^{(2)} = (\alpha - K_i^{(2)}) = Z_p^{(2)} = \alpha - K_p^{(2)}; \quad (5.6)$$

Общее выражение для модульных коэффициентов из  $n$  рядом стоящих лет опуская преобразования будет иметь вид

$$Z_p^{(n)} = (\alpha - K_p^{(n)}) \cdot n; \quad C_v^{(n)} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}; \quad (5.7)$$

$$\beta_{\text{мин}} = \max Z_p^{(n)} = \max [(\alpha - K_p^{(n)}) \cdot n]; \quad C_s^{(n)} = \frac{C_s}{\sqrt{n}} \quad (5.8)$$

Решение задачи по 1 способу Крицкого и Менкеля при определенном значении  $C_v^{(n)}$  и следовательно  $K_p^{(n)}$  сводится к нахождению такой критической длительности маловодного периода  $n = n_0$  при которой  $Z_p = \alpha (\alpha - K_p^{(n)}) \cdot n$  обращается в  $\max$ , т.е. необходимо задаваться  $n = 1; n = 2$  и т.д., что усложняет расчет.+

Облегчить расчет позволяет графическое решение, которое было дано Крицким С.Н. и Менкелем М.Ф.

$$Z_p^{(n)} = (\alpha - K_p^{(n)}) \cdot n + n - n = \alpha \cdot n - K_p^{(n)} \cdot n + n - n = n - K_p^{(n)} \cdot n - n + \alpha \cdot n = n (1 - K_p^{(n)}) - n (1 - \alpha) = Z_1 - Z_2;$$

$$\text{где } Z_1 = (1 - K_p^{(n)}) \cdot n; \quad (5.9)$$

$$Z_2 = (1 - \alpha) \cdot n; \quad (5.10)$$

Зная  $P, C_v^{(n)}, C_s^{(n)}$  можно построить кривую  $Z_1 = (1 - K_p) \cdot n$  – которую следует рассматривать как суммарную кривую притока; а  $Z_2 = (1 - \alpha) \cdot n$  – как суммарную кривую потребления.

При  $\alpha = 1; Z_2 = 0$ , т.е. касательную проводим параллельно оси  $n$ .

Искомый объем – это наибольшее  $\beta_{\text{мин}}$ , а ему соответствует  $n_0$ .

4). Найденная величина  $n_0$  – критическая длительность маловодного периода отвечает наиболее вероятному, но не единственно возможному сроку полной сработки водохранилища (поскольку возможно составить из исходных данных и другие комбинации рядов, отличные от исходного ряда). Это положение явилось основой для II способа С.Н. Крицкого и М.Ф. Менделя.

## **Лекция № 6. РЕГУЛИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩА НА СБРОСНЫЕ РАСХОДЫ**

6.1. Второй способ С.Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля при расчете многолетней емкости водохранилища.

6.2. Графики Я. Ф. Плешкова и др. для расчета многолетнего регулирования стока.

6.3. Регулирующие влияние водохранилища на максимальные расходы воды.

6.4. Сущность расчета сбросных сооружений.

6.5. Уравнение сбросных расходов.

### **6.1. Второй способ С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля при расчете многолетней емкости водохранилища**

Разработан в 1935 году. Устранение отмеченных недостатков достигнуто во II способе Крицкого и Менкеля. Смысл этого способа заключается в том, что если наряду с заданными нормой годового стока  $W_0$ ;  $C_v$ ;  $C_s$ ;  $\alpha$  была задана ещё и емкость водохранилища  $\beta_{\text{мн}}$ , то искомой величиной оказалась бы обеспеченность  $P$ , которая характеризовала число лет, в течение которых при указанных характеристиках наблюдалась бы бесперебойная работа, т.е.

$$P = 100 - S \quad (6.1)$$

Задача решается путем определения числа перебойных лет  $S_1$ .

Рассмотрим сам метод расчета.

Предположим, что наряду с известными  $C_v$ ;  $C_s$ , а следовательно и кривой обеспеченности заданы  $\alpha$  и  $\beta_{\text{мн}}$ . Определим вероятность (относительное число) таких лет, в течение которых заданная отдача, несмотря на наличие многолетнего объема, не будет полностью обеспечена, т.е. будут перебои в подаче гарантированного количества воды.

1. Если  $K_i > \alpha$  – дефицита нет.

2. Дефицита нет если  $K + \beta \geq \alpha$  или  $K \geq \alpha - \beta$ .

3. Если  $K_i < \alpha - \beta$  – дефицит.

На график (рис.2)  $K = f(P)$  нанесем ординаты соответствующие:

1).  $K_i \geq \alpha - \beta$  (перебоев нет, даже если водохранилище еще не наполнено  $\beta_{\text{мн}} = 0$  Число этих лет  $A_1 = P_\alpha$ .

2). Годы лежащие ниже  $K_i < \alpha - \beta$  вероятность которых  $S_1 = 1 - P_{\alpha-\beta}$

являются безусловно перебойными.

3). Группа лет для которых  $\alpha > K_1 > \alpha - \beta$  – условно перебойные с вероятностью  $N_1 = P_{\alpha - \beta} - P_{\alpha}$ , т.к. при сочетании любого года эти группы с предшествующим ему, может возникнуть дефицит, т.е. возникает задача построения и анализа кривой обеспеченности суммарных величин стока за двухлетие, (где в качестве одного года выступает группа  $N$ , а в качестве другого основная кривая обеспеченности).

## **6.2. Графики Я. Ф. Плешкова, Г. П. Иванова, А.Д. Саваренского и др. для расчета многолетнего регулирования стока**

Расчеты многолетнего регулирования стока вторым методом Крицкого и Менкеля очень трудоемки. Поэтому с целью облегчения расчетов впервые Я.Ф.Плешков в 1939 году разработал расчетные графики, которые позволяют быстро решать задачи многолетнего регулирования стока. На графиках представлена зависимость многолетней составляющей емкости  $\beta_{mn}$  от коэффициента зарегулирования стока –  $\alpha$  и коэффициента изменчивости –  $C_v$  при значениях обеспеченности  $P = 75; 80; 85; 90;$  и  $95\%$  при  $C_s = 2C_v$  и коэффициентом корреляции между стоком смежных лет  $r = 0$ .

Порядок пользования графиками:

1. Выбирается график требуемой обеспеченности –  $P$ ;
2. По известному  $\alpha$  и  $C_v$  определяется  $\beta_{mn}$ .

Можно также решать и обратные задачи.

В практике водохозяйственных расчетов нередки случаи когда  $C_s \neq 2C_v$ , а между стоком смежных лет существует коррелятивная связь, т.е.  $r > 0$ . Поэтому в данном случае пользуются графиками Г.П. Иванова, А.Д. Саваренского, И.В. Гуглия, Ш.Ч.Чокина, а также обобщенными графиками Г.Г. Сванидзе.

## **6.3. Регулирующее влияние водохранилища на максимальные расходы воды**

Паводочная волна проходя через водохранилище меняет свою форму или как говорят, трансформирует (превращается). Трансформация половодий может осуществляться:

- 1) как емкостью водохранилища подлежащей ежегодной сработке  $V_{плз}$ ;
- 2) так и емкостью создаваемой сверх  $V_{плз}$  и лежащей между НПУ и ФПУ, т.е. емкостью фарсировки  $V_{ф}$ . Расчет пропуска паводка отли-

чается от ранее рассмотренного наполнения водохранилища паводочным стоком, т.к. при расчете  $V_{плз}$  исходят из гидрографа маловодного года  $P = 75 \dots 95\%$ , а пропуск паводка рассчитывается на многоводный год  $P = 0,1 \dots 10\%$

а) Для средних и крупных рек с половодьем от снеготаяния трансформация паводка осуществляется полезной емкостью,  $V_{плз}$ , т.к. на таких реках возможно предвидеть время наступления паводка и размер половодья и к этому времени снизить уровень до определенной отметки.

б) На малых реках такой прогноз невозможен и пропуск паводка осуществляется при наполнении водохранилища до отметки НПУ.

Слой регулирующей емкости  $h_{ср}$  определяется в зависимости от предельно допустимого затопления окружающей местности, которая принимается  $h_{ср} = 0,5 \dots 1,5$  м.

В литературе встречается понятие ретрансформации – это перенос графика притока, построенного для створа плотины во входной створ водохранилища, что позволяет исключить регулирующее влияние поймы реки на паводок до создания водохранилища. Это делают для крупных водохранилищ. Для малых – входной створ совпадает со створом плотины.

Образование объема фарсировки,  $V_{ф}$ , аккумулирующей часть стока высоких вод позволяет:

а) снизить  $\max$  расходы поступающие в НБ водохранилища и тем самым предотвратить наводнения на нижерасположенных территориях (участках реки).

б) позволяет уменьшить размеры водосбросных сооружений (т.к. сбрасывается не  $Q_m$ , а  $q_m$ );  $Q_m \geq q_m$

Оптимальный объем  $V_{ф}$ , предназначенный для снижения максимальных расходов половодья (паводка) или борьбы с наводнениями в НБ – фе водохранилища устанавливаются на основе технико-экономических расчетов.

#### **6.4. Сущность расчета сбросных сооружений**

Расчет сбросных сооружений ведется обычно для наиболее невыгодных условий, когда расчетный паводок начинается при водохранилище, заполненном до НПУ.

Сбросные сооружения могут быть 2-х типов:

а) водослив в верхней части плотины – В;

б) отверстие или труба в нижней её части –  $\omega$ .

Расход через водосбросное сооружение определяется 2-мя величинами:

а) размером сооружения ( $B$  или  $\omega$ ) и

б) напором  $h_{\phi}$ .

Размеры сооружения и напор должны рассчитываться по наибольшему расходу  $q_m$ , проходящему через сооружение, которому соответствует и наибольший напор  $h_{\phi}$  при ФПУ.

1). Если площадь зеркала водохранилища невелика, то  $V_{\phi}$  заключенный между НПУ и ФПУ будет незначителен по сравнению с паводочным притоком и не окажет регулирующего влияния на паводочные расходы и тогда максимальный сбросной расход  $q_m$  можно считать равным максимальному расходу половодья  $Q_m$ , т.е.  $q \sim Q_m$  и затруднений в расчете не возникает (рассчитыв.  $B$  по  $Q_m$ ).

2). Если же объем между НПУ и ФПУ представляет заметную долю от объема паводкового стока, то этот объем оказывает регулирующее влияние на паводочный приток, часть последнего задерживается в водохранилище, вследствие чего сбросные расходы в начале половодья становятся несколько меньше, поступающих в водохранилище. Наибольший расчетный сбросной расход  $q_m < Q_m$ , что позволяет уменьшить размеры сбросного сооружения  $B$  или  $\omega$ .

Величина  $q_m$  будет тем меньше по сравнению с  $Q_m$ , чем больше будет подъем уровня  $h_{\phi}$ . Таким образом определить  $q_m$  можно только в связи с определением размеров сбросного сооружения, что значительно усложняет расчет.

## 6.5. Уравнение сбросных расходов

Запишем дифференциальное уравнение графика сбросных расходов. Допустим, что в начальный момент времени  $t$ , напор на сооружении будет  $h$ , приток к водохранилищу  $Q$ , а сбросный расход  $q$ , площадь зеркала на соответствующей отметке  $\Omega$ . За элементарный промежуток времени  $dt$  уровень воды в водохранилище поднялся на  $dh$  и в водохранилище будет аккумулирован объём  $\Omega \cdot dh$ .

Тогда уравнение баланса воды в водохранилище за время  $dt$  выразится дифференцированным уравнением

$$Q dt - q dt = \Omega \cdot dh, \quad Q - q = \Omega \frac{dh}{dt} \quad (6.1)$$

Точное интегрирование уравнения (6.1) возможно лишь при  $Q = \text{const}$  и  $\Omega = \text{const}$ .

Запишем приращение объема воды за интервал времени  $t$ . Оно получено из (6.1).

$$V_{\kappa} - V_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}} + Q_{\kappa}}{2} \cdot \Delta t - \frac{q_{\text{н}} + q_{\kappa}}{2} \cdot \Delta t, \quad (6.2)$$

где  $Q_{\text{н}}$ ,  $q_{\text{н}}$ ,  $V_{\text{н}}$  - приток, сброс и объем воды в водохранилище в начале интервала времени  $t$ .

$Q_{\kappa}$ ,  $q_{\kappa}$ ,  $V_{\kappa}$  - тоже в конце интервала.

При графоаналитических расчетах в конечных приращениях уравнение (6.2) запишется в виде

$$V_{\kappa} + \frac{1}{2} q_{\kappa} \cdot \Delta t = Q_{\text{ср}} \cdot \Delta t + (V_{\text{н}} + \frac{1}{2} q_{\text{н}} \cdot \Delta t) - q_{\text{н}} \cdot \Delta t. \quad (6.3)$$

В уравнении (6.3) неизвестны сбросной расход  $q_{\kappa}$  и объем водохранилища  $V_{\kappa}$  на конец интервала. В результате расчета находят ординаты гидрографа сбросных расходов. Сбросные расходы вычисляют в зависимости от параметров водопропускных сооружений и ёмкости водохранилища. Аналитический или табличный расчет выполняют методом подбора.

## СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

- 7.1. Компенсирующее регулирование стока.
- 7.2. Каскадное регулирование стока.
- 7.3. Водоохранилище с подводящим каналом.
- 7.4. Система водохранилищ на притоках

### 7. 1. Компенсирующее регулирование стока

Компенсирующее регулирование стока – это покрытие дефицита в воде путем попусков из водохранилищ, расположенных выше водозабора (на притоках выше створа основной реки).

Устройство водохранилища в створе водозабора невозможно либо по топографическим, либо по техническим условиям (населенный пункт, судоходство, и т. д.)

В этом случае прибегают либо к строительству водохранилища выше створа, либо на притоке или системе водохранилищ.

В нашем случае водохранилище расположено на притоке. Между створами водохранилища (ств.В) и водозабора (ств.А) находится площадь водосбора на которой сток не зарегулирован и составляет  $-Q_A$ . Требуемую отдачу  $-q_A$  в месте водозабора обеспечивают как за счет не зарегулированной части стока  $-Q_A$ , так и попусков воды из водохранилища на притоке  $Q_B$ .

Для определения  $V_{плз}$  компенсирующего водохранилища В строят графики

$$Q_A = f(t); \quad Q_B + q_F = f(t) \quad \text{и} \quad q_A = f(t).$$

Рассмотрим, какой расход можно забрать для наполнения водохранилища в характерные моменты  $t_1$ ;  $t_2$ ;  $t_3$ ;

1) В момент  $t_1$  расход  $Q_A > q_A$  – отдачи, поэтому весь расход притока  $Q_B$  можно задержать в водохранилище и при этом останется ещё свободный избыток стока равный  $-v_c$ , который дают другие притоки.

2) В момент  $t_2$  приток В дает расход  $a'v'$ , но из него оставляют в водохранилище только ту часть, которая является избытком стока над потреблением у точки А, т.е.  $a'c'$ .

3) В момент  $t_3$ , в нижнем створе имеет место дефицит, и из расхода  $Q_B$  задерживать ничего нельзя.

Таким образом  $W'_B$  – избыточный сток притока В, который может быть использован для компенсирующего регулирования, определяется площадью (заштрихованной) на графике.

$$Q_A = f(t) \quad \text{и} \quad Q_B + q_A = f_1(t) \quad \text{и} \quad \text{отдачей} \quad q_A = f_2(t).$$

**Таблица 1.1. Расчет компенсирующего регулирования стока**

Расч. интервал $\Delta t$	Расход в створе водозабора, $\text{м}^3/\text{с}$		$\theta_A - q_A$		Расход в створе вод-ща $\theta_B$ , $\text{м}^3/\text{с}$	Объем избыточ. стока $W_k$ , $\text{м}^3$	Наполн. вод-ща $V_k$ , $\text{м}^3$	Сбросы воды из вод-ща $R$ , $\text{м}^3$
	$\theta_A$	$q_A$	+	-				
1	2	3	4	5	6	7	8	9

## 7.2. Каскадное регулирование стока

Каскадом называют систему водохранилищ последовательно расположенных в виде ступеней вдоль какой либо реки.

а) Если бьефы плотин, создающих водохранилище, примыкают один к другому имеет место – сомкнутый каскад

В противном случае

б) каскад называют несомкнутым.

Расчеты регулирования стока каскадом водохранилищ выполняют:

1. Графическим способом по календарным гидрологическим рядам.

2. Табличным способом.

1. При графическом способе расчета строят интегральные кривые стока  $Wc = f_1(t)$  и отдачи  $U = f_2(t)$  в косоугольных координатах (сокращенные и разностные кривые) для верхнего створа и определяют  $V_{плз}$ , его наполнение и сбросы.

Далее по данным гидрометрических наблюдений, во втором по течению створе каскада, строят интегральную кривую стока для следующей ступени и т. д. ( $V_{плз2}$ ) и далее переходят к третьему каскаду.

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

## 7.3. Водоохранилище с подводящим каналом

Одной из мер борьбы к уменьшению поступления наносов в водохранилище является расположение водохранилища не в главной долине, имеющей большую водосборную площадь, а в боковой долине имеющей малый бассейн, с питанием водохранилища особым каналом.

При проектировании водохранилища в боковой долине (балке) с подводящим каналом, дополнительный расчет заключается в определении пропускной способности подводящего канала  $Q_k$ .

Пропускная способность канала должна быть выбрана таким образом, чтобы в течение периода избытков стока, канал мог пропустить объём воды необходимый для наполнения водохранилища  $V_1$ , (заштрихованная площадь), который в дальнейшем пойдет на покрытие недостатка воды  $V_2$  из водохранилища. Следовательно  $V_1 > V_2$ , а  $V_{плз} = V_2$ ;

Чем короче период избытков, тем больше должна быть пропускная способность канала, чтобы отвести в водохранилище необходимый объём воды.

#### **7.4. Система водохранилища на притоках**

До сих пор нами рассматривались случаи, когда водохранилище располагается в месте забора воды из реки, и следовательно регулирует сток со всего используемого бассейна А.

Однако, часто устройство водохранилища в месте забора оказывается невозможным по топографическим или геологическим условиям, ввиду чего приходится устраивать водохранилища на притоках В, С, Д. В результате получается система водохранилищ регулирующих сток данного бассейна.

При расчете такой системы приходится решать следующие вопросы:

1. Найти (определить) график избыточного стока этих притоков.

2. Путем сопоставления этого графика с графиком попусков из водохранилища, требуемых для поддержания заданного расхода  $q_A$  точке А, выясняется как суммарный объем, так и объем каждого из них в отдельности.

3. Устанавливается график работы водохранилищ.

При этом необходимо помнить, что в данном случае допускается множество решений как в отношении распределения общего объёма между отдельными водохранилищами, так и в отношении режима эксплуатации.