

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ АРХИТЕКТУРЫ, ДИЗАЙНА И СТРОИТЕЛЬСТВА  
Кафедра гидротехнического строительства и водных ресурсов

**Фролова Г.П., Ершова Н.В.**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**для выполнения практических работ**  
**по дисциплине «Гидрология и гидрометрия»**

Бишкек 2019

УДК 556.04:627.133(072)

Ф.....

Рекомендовано к изданию кафедрой  
Гидротехнического строительства и водных ресурсов

Составители: **Фролова Г.П., Ершова Н.В.**

Ф 91 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ для выполнения практических работ по дисциплине «Гидрология и гидрометрия» для студентов направления «Строительство», профилей «Гидротехническое строительство», направления «Природообустройство и водопользование», профиль «Комплексное использование и охрана водных ресурсов». Бишкек: КРСУ, 2019. – 64 с.

Приведены материалы для выполнения практических работ в соответствии с рабочей программой дисциплины, включая цель работы, исходные данные, общие сведения по тематике расчетов, изложен порядок и пример выполнения задания.

Предназначены для студентов направления «Строительство», профиль «Гидротехническое строительство» и «Природообустройство и водопользование», профиль, «Комплексное использование и охрана водных ресурсов». Могут быть полезны для студентов других направлений, изучающих вопросы гидрологии и специалистов, занимающихся вопросами гидрологического обоснования при инженерно-строительном проектировании.

© ГОУВПО КРСУ, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5	С.
.....		
1. Гидрографические характеристики реки	6	
.....		
2. Основные характеристики бассейна реки	14	
.....		
3. Определение и расчет годового стока реки при наличии данных наблюдений	21	
...		
4. Расчет и построение кривых обеспеченности годового стока реки при наличии данных наблюдений	26	
.....		
5. Расчет характерных расходов воды при наличии данных наблюдений	33	
.....		
6. Расчет и построение батиграфических кривых водохранилища. Определение минимального уровня воды в водохранилище – УМО	399	
.....		
7. Наблюдения за динамикой характеристик водохранилища и их расчет	55	
.....		
ЛИТЕРАТУРА	63	
.....		

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Строительство сооружений на водных объектах всегда сопряжено с предварительным изучением гидрологии водного объекта – водотока или водоема, характеристик бассейна реки, определением местоположения створа будущего сооружения. Необходимым атрибутом является топографическая карта крупного масштаба или топографический план, который является основой выбора местоположения сооружения и расчетов, связанных с топографией местности (гидрографические характеристики реки, площадь водосбора, площадь затопления и др.). При наличии ряда наблюдений за стоком реки (расходы, уровни, сток наносов и др.), используют эти данные при расчетах, необходимых для предварительного этапа проектирования гидротехнического сооружения.

В методических указаниях предлагаются студентам для выполнения 7 практических работ. Первые две работы «Гидрографические характеристики реки» и «Основные характеристики бассейна реки» предполагают работу с топографической картой масштаба 1:200000, которые чаще всего используются в гидрологических исследованиях, связанных с определением гидрографических и морфометрических характеристик реки. Студенты должны по карте определить местоположение конкретной реки, выявить данные, необходимые для расчетов.

Следующие три работы «Определение и расчет годового стока реки при наличии данных наблюдений», «Расчет и построение кривых обеспеченности годового стока реки при наличии данных наблюдений», «Расчет характерных расходов воды при наличии данных наблюдений» предполагают выполнение всех расчетов в программе Excel. Преподавателем будут предоставлены исходные данные рядов наблюдений за жидким стоком реки для расчетов статистических характеристик реки.

Последние две работы «Расчет и построение батиграфических кривых водохранилища. Определение минимального уровня воды в водохранилище – УМО», «Расчет водохранилища годичного регулирования стока без учета потерь» связаны с вопросами регулирования стока. Необходимость определения батиграфических характеристик, объема водохранилища, является исходным материалом для последующего выбора местоположения и подбора конструкций гидротехнических сооружений, располагаемых в теле плотины.

## ГИДРОГРАФИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКИ

**Цель задания:** Усвоить терминологию и методику определения основных гидрографических характеристик реки.

**Исходные данные:** топографическая карта территории Кыргызстана масштаба 1:200000.

### **Общие сведения:**

Совокупность рек и речек, сливающихся вместе и выносящих свои воды в виде общего потока, представляет собой **речную систему**.

Водный объект, характеризующийся движением воды в направлении уклона в углублении земной поверхности, называется **водоток**. В постоянном водотоке движение воды происходит в течение всего года или большей его части, во временном – движение происходит в меньшую часть года.

**Река** – водоток значительных размеров, питающийся атмосферными осадками со своего водосбора и имеющий четко выраженное русло.

Каждая река имеет **исток, верхнее, среднее, нижнее течение и устье**.

**Исток** - начало реки, соответствующее месту с которого появляется постоянное течение воды в русле. Истоком реки часто является озеро, родник, болото или ледник.

**Устьем** реки называется место впадения реки в море, озеро или другую реку. В засушливых районах некоторые реки не доходят до моря и имеют **слепое устье** (р. Чу).

Река, впадающая непосредственно в море или бессточное озеро, называется **главной рекой**. Реки, впадающие в главную реку, называются **притоками первого порядка**. В притоки первого порядка впадают **притоки второго порядка** и т.д.

**Основные характеристики речной системы** – длина составляющих ее рек, густота речной сети, извилистость и разветвленность рек.

### **1. Длина реки**

Длиной реки называется расстояние по реке от устья до истока в километрах.

Длина реки может определяться циркулем или курвиметром. При работе с циркулем длина реки измеряется постоянным раствором  $n$ , равным один или два миллиметра. Величина  $n$  тщательно устанавливается перед началом работы и периодически проверяется в ее процессе. Длины измеряются дважды. В начале от устья реки до истока с отсчетом

числа  $M$  на каждом участке. Затем в обратном направлении. За окончательное значение принимается среднее значение. Длина реки при измерении циркулем вычисляется по формуле

$$L = n a K, \quad (1)$$

где  $n$  - среднее число отложений раствора циркуля;

$a$  - значение раствора циркуля в масштабе карты, км;

$K$  - поправочный коэффициент на извилистость, определяемый для каждого участка по специальным образцам (рис.1, табл.1).

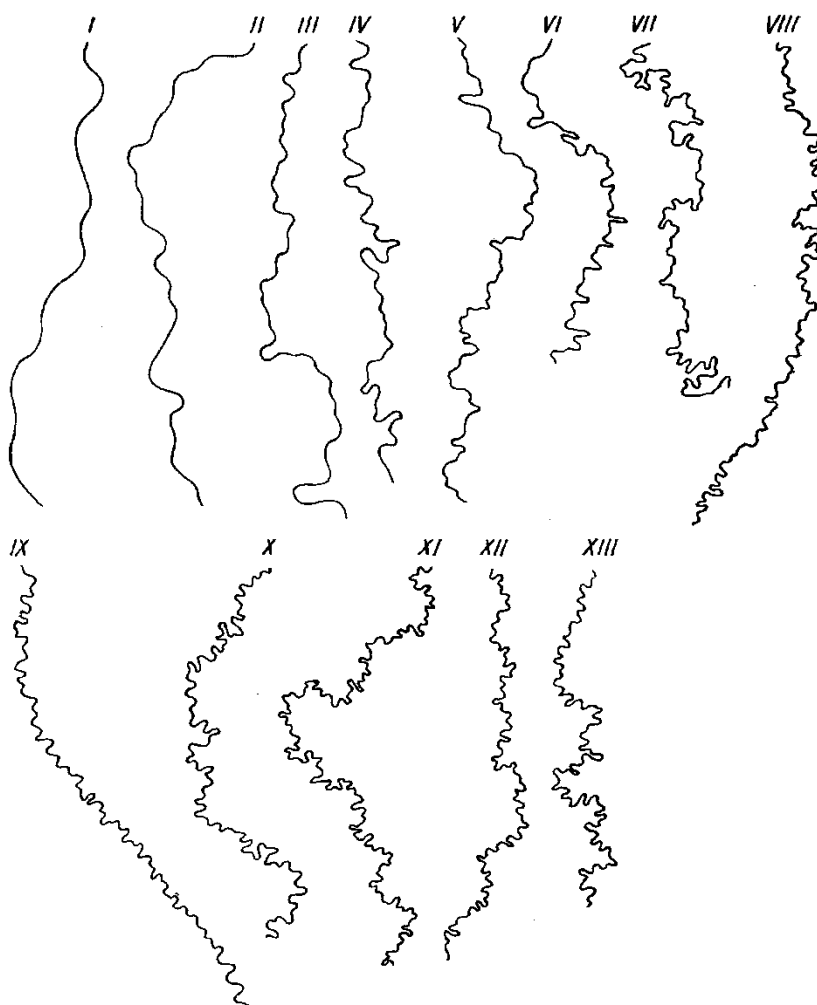


Рисунок 1– Образцы извилистости рек

При измерении курвиметром, поправочный коэффициент не вводится. Длина реки определяется:

$$L = n M, \quad (2)$$

где  $n$  – длина реки в сантиметрах, измеренная курвиметром;

$M$  – масштаб карты.

Таблица 1 – Таблица значений коэффициента извилистости

№ образца		I	II	III	IV	V	VI	VII
Коэффициент извилистости при растворе циркуля	1 мм	1.00	1.01	1.03	1.05	1.07	1.11	1.13
	2 мм	1.01	1.02	1.05	1.08	1.20	1.29	1.36
№ образца		VIII	IX	X	XI	XII	XIII	
Коэффициент извилистости при растворе циркуля	1 мм	1.00	1.01	1.03	1.05	1.07	1.11	
	2 мм	1.01	1.02	1.05	1.08	1.20	1.29	

## 2. Извилистость

Извилистость рек характеризуется коэффициентом извилистости  $K_{изв}$ , представляющей собой отношение фактической длины  $L$  определенной с учетом всех извилин, к длине прямой линии  $L'$ , соединяющей начало и конец участка, для которого определяется коэффициент извилистости:

$$K_{изв} = L / L' \quad (3)$$

Коэффициент извилистости не может быть меньше единицы.

## 3. Гидрографическая схема речной сети

Для удобства построения гидрографической схемы необходимо составить список рек по форме табл. 2. В таблице приведены данные по р. Кара-Ункур (Джалалабадская область Кыргызстана) в сокращенном варианте.

Таблица 2 – Список рек бассейна реки.....(название реки)

№	Название реки	С какого берега впадает	Расстояние от устья, км
1	1	ЛБ	38,81
2	2	ЛБ	38,10
3	3	ЛБ	35,37
4	4	ПБ	33,72
5	5	ПБ	32,19
9	Кумьшсу	ЛБ	24,90
13	12	ПБ	16,11
14	13	ЛБ	15,55
15	Куровес	ЛБ	10,04
16	14	ЛБ	7,24
20	18	ПБ	0,59

Для схематического изображения речной системы составляется гидрографическая схема. При ее построении используются длины главной реки и притоков и расстояния мест впадения притоков в главную реку. При построении гидрографической схемы по горизонтали в выбранном масштабе откладывается длина главной реки, ее притоки под произвольным углом, обычно порядка 30-40°, но в масштабе, в виде прямых линий, откладываются от линии главной реки в местах их впадения, определяемых по расстоянию от устья. У линий выписываются названия притоков (или их номера при отсутствии названия) и их длина в км.

На основной реке отмечаются населенные пункты, гидросты, мосты и др. На рис. 2 приведен пример выполнения гидрографической схемы для реки Кара-Ункур,

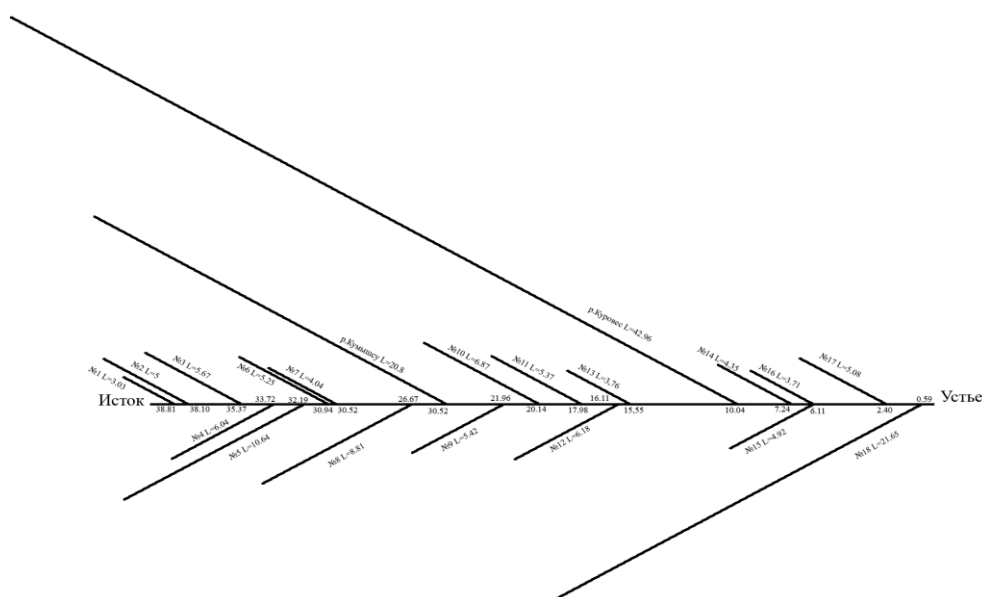


Рисунок 2 – Гидрографическая схема р. Кара-Ункур

#### 4. Продольный профиль и уклон реки

*Продольный профиль реки* показывает изменение высотных отметок реки или лога по их длине.

Уклоны изменяются в течение года в зависимости от колебаний горизонтов воды. Так, если рассматривать небольшой участок реки, то в период низких вод уклон воды на перекатах больше, чем на плесах. Уклоны потока во время высоких вод выравниваются и делаются обычно большими, чем в период низких вод. В первую очередь это явление наблюдается в период подъема половодья. На изгибах реки или в местах, где русло сужается берегами, уклоны поверхности реки больше, чем на участке реки выше этих мест.

В начальной стадии формирования продольного профиля реки на разных её участках интенсивно идут процессы русловой эрозии как глубинной, так и боковой. Глубинная эрозия представляет собой врезание водотока в вертикальном направлении в толщу грунта.

Боковая эрозия ведет лишь к расширению русла или перемещению этого русла в горизонтальном направлении в пределах речной долины. Глубинная эрозия зависит от положения *базиса эрозии*, т. е. поверхности, ниже которой река не может углубить свое ложе. Базисы эрозии могут быть постоянными (общими) как, например, уровень моря или озера, куда впадает река, либо временными (местными), например высотный уровень каменного трудно размываемого пласта. При устойчивом положении базиса эрозии происходит постепенное выравнивание продольного профиля реки, что характеризует стадию зрелости реки. В стадиях поздней зрелости, благодаря регрессивной эрозии, область больших уклонов перемещается в верховья реки, делая весь её профиль всё более и более пологим. В пределе река стремится сформировать так называемый *профиль равновесия*, при котором процесс глубинной эрозии теоретически должен прекратиться. Однако на практике условия равновесия всё время нарушаются, а река непрерывно стремится их восстановить.

В настоящее время продольный профиль реки может изменяться в результате хозяйственной деятельности человека, которая, в частности, приводит к изменению базиса эрозии при строительстве плотин за счет изменения уровней внутренних водоёмов.

Из большого разнообразия продольных профилей рек можно выделить четыре основных типа (рисунок 3):



Рисунок 3 – Основные типы продольных профилей рек

1. *Плавновогнутый* – характеризуется вогнутой кривой гиперболического типа, более крутой в верховьях реки и пологий в низовьях. Этот профиль наиболее близок к теоретическому профилю равновесия, характерен для большинства равнинных рек и рек горных районов со складчатой структурой земной коры (например, профили рек Риони, Вахш, Селенга).

2. *Прямолинейный* – характеризуется относительно одинаковыми уклонами на всём протяжении реки. Наблюдается главным образом у малых рек, реже – у горных рек (Кама, Пянь и др.)

3. *Ступенчатый* – образуется при наличии промежуточных базисов эрозии, связанных с наличием проточных озер или участков с трудноразмываемыми породами.

4. *Выпуклый (сбросовой)* – характеризуется пониженными уклонами в верховье и повышенными в низовье реки; встречается редко (в России – реки Карелии и Кольского полуострова).

Участки рек с сосредоточенным падением и бурным течением, приуроченные к местам выхода на поверхность трудноразмываемых пород, носят название порогов. Падение воды с отвесного уступа называется водопадом. Ступенчатый продольный профиль с многочисленными порогами и водопадами свойственен горным рекам.

Продольный профиль строится на основании данных о протяженности отдельных характерных участков реки и высотных отметок границ этих участков.

Границами участков могут быть места резкого увеличения или уменьшения глубин, пороги, перекаты, острова, устья притоков, места подпора, изменение ширины русла и др.

Продольный профиль может быть построен по топографической карте.

На карте по реке измеряются расстояния от устья до всех пересекающих реку горизонталей и других точек с нанесенными высотными отметками. Снимаются отметки всех горизонталей и определяются отметки истока и устья реки. По горизонтальной оси откладываются расстояния от истока до границ характерных участков или мест пересечения реки горизонталями и положение других точек с известными отметками, по вертикальной оси – высотные отметки. Полученные точки соединяются прямыми отрезками. По всем этим данным строится продольный профиль реки. Масштаб выбирается исходя из удобства построения, причем вертикальные и горизонтальные масштабы неодинаковые. На рис. 4 приведен пример построения продольного профиля.

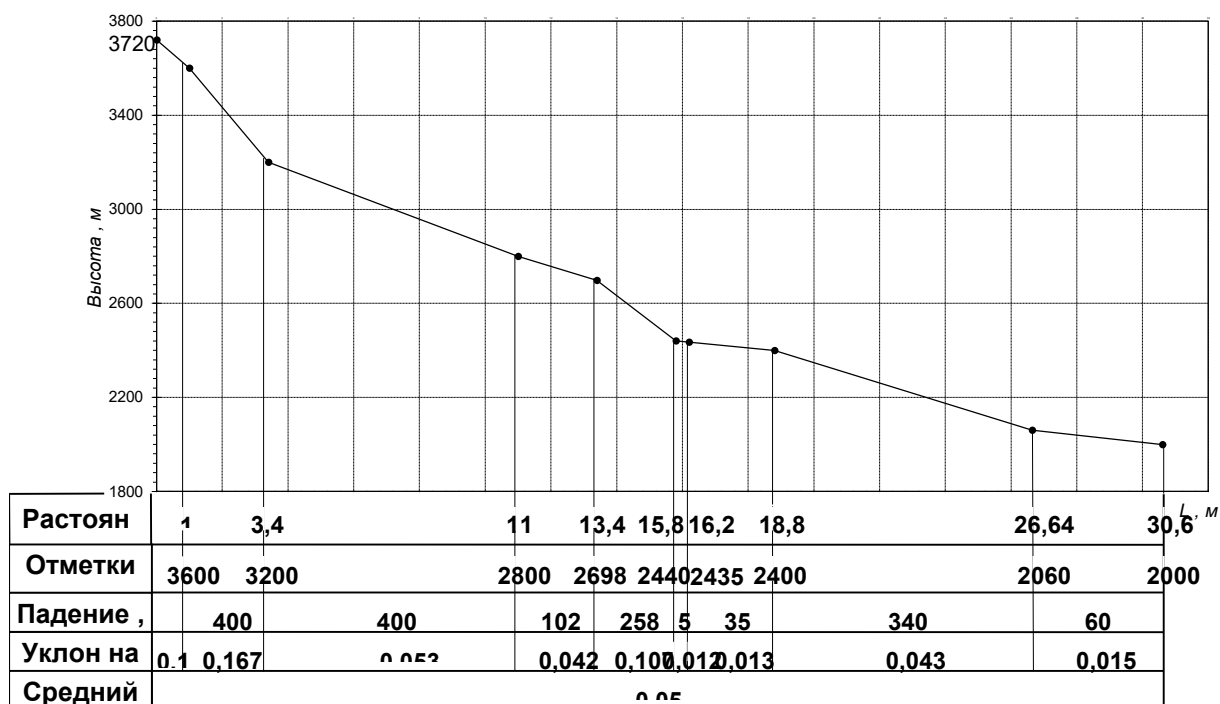


Рисунок 4 – Продольный профиль дна р. Кара-Ункур

Уклоном  $i$  называют отношение разности высотных отметок дна в начале и конце участка, называемых падением  $\Delta H$ , к длине участка  $l$ .

$$i = \Delta H / l \quad (4)$$

Уклон обычно выражается в относительных единицах. Иногда употребляется выражение уклона в промилях ( $^0/_{00}$ ), что означает падение, выраженное в тысячных долях от длины участка. Принято различать средний и средневзвешенный уклон реки и участка.

Уклон водной поверхности реки  $I$  определяют по уклону поверхности воды в реке. Высотные отметки урезов воды, определенные при обследовании, приводятся к так называемому мгновенному уровню. Мгновенным называется уровень в один и тот же момент времени для всех точек определения. Приводка осуществляется по данным водомерных постов. Часто в гидрологических расчетах в место уклона водной поверхности реки  $I$  принимают уклон дна  $i$ , который легко определяется по картам или снимается с продольного профиля.

## Задание

1. Выбрать на топографической карте Кыргызстана реку, определить длину реки и ее притоков первого порядка до замыкающего створа.

При измерении циркулем, все измерения и вычисления записываются в табл. 2. При измерении курвиметром, графы 3, 4, 5, 6, 8, 9 не заполняются. Участки назначаются на поворотах реки или при впадении притоков в главную реку.

Таблица 2 – Ведомость измерения длин рек в бассейне реки.....(название реки)

№ п/п	Место засечки	Число отложений			Измерен ная длина (км)	$K_{из}$	Вычисле нная длина	Расстоян ие от устья (км)	
		От устья	Между засечками						
			1 измер ение	2 измер ение					Сред нее
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Устье								
2	Участок 1								
3	Участок 2								
7	Исток								

2. Определить коэффициент извилистости реки до замыкающего створа.

3. Составить таблицу списка притоков реки с определением расстояний от устья и координат истоков (СРС). Построить гидрографическую схему речной сети.

4. Построить продольный профиль реки по горизонталям. Выделить на профиле участки реки: горный, предгорный, равнинный. Оценить форму профиля (плавновогнутый, ступенчатый или др.).

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАССЕЙНА РЕКИ

**Цель задания:** Усвоить терминологию и методику определения основных характеристик бассейна реки.

**Исходные данные:** топографическая карта территории Кыргызстана масштаба 1:200000; река, принадлежащая к одному из гидрологических бассейнов.

### **Общие сведения:**

Каждый водный объект на поверхности суши имеет свою область питания, или **водосбор**, представляющий собой часть земной поверхности и толщу почв и горных пород, откуда вода поступает к водному объекту (рис. 1).

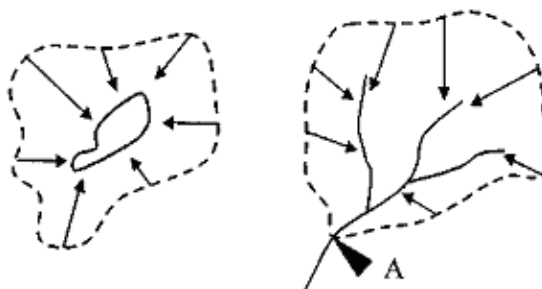


Рисунок 1 – Водосборы бессточного озера и реки для створа А

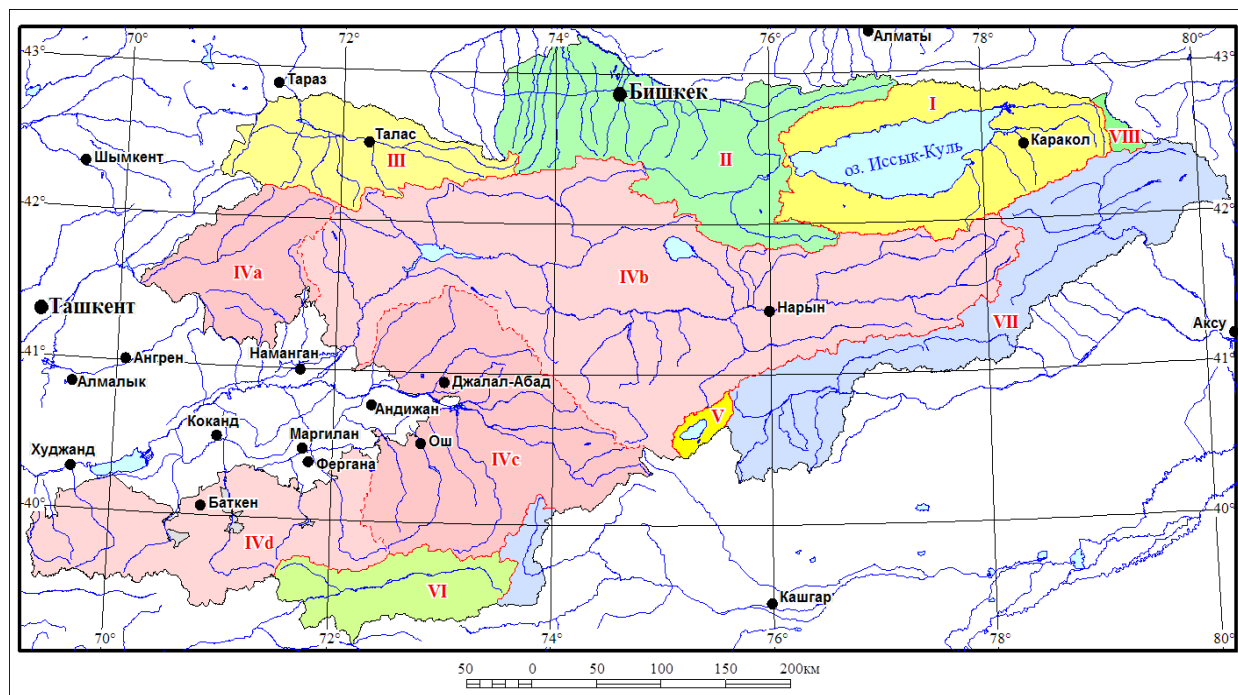
Водосборы водных объектов отделяются друг от друга **водоразделами**, т. е. линиями, проходящими по наивысшим точкам земной поверхности, расположенной между ними.

Поверхностные и подземные водосборы не всегда совпадают, особенно у малых рек, у которых из-за геологических условий происходит активный водообмен между бассейнами. Однако в гидрологических расчетах за площадь водосбора часто принимают размер только поверхностного водосбора из-за отсутствия необходимых данных для определения подземного. Соответственно различают поверхностный и подземный сток.

Наряду с термином **водосбор** в гидрологии используется термин **бассейн** водного объекта. *Бассейн водного объекта включает в себя часть земной поверхности, отделенную от других водных систем линией водораздела* (рис. 2). Площади водосбора и бассейна могут не совпадать, если внутри бассейна имеются области внутреннего стока. В этом случае площадь водосбора будет меньше площади бассейна. Нижний створ на реке,

ограничивающий рассматриваемый бассейн, называется *замыкающим створом*. У замыкающего створа гидрометрическими методами определяется речной сток  $Y$ .

Рисунок 2 – Основные гидрологические бассейны



I – оз. Иссык-Куль; II – р. Чу; III – р. Талас; IV – р. Сырдарья; V – оз. Чатыр-Куль; VI – р. Амударья; VII – р. Тарим; VIII – оз. Балхаш; IVa – северное обрамление Ферганской долины; IVb – р. Нарын; IVc – р. Карадарья; IVd – южное обрамление Ферганской долины

В практике гидрологических расчетов для количественного описания индивидуальных особенностей водосбора (его размера, формы и т. д.) используются некоторые числовые показатели, которые называют *морфометрическими характеристиками*. Рассмотрим наиболее важные из них.

*Площадь водосбора (F)* является одной из основных характеристик (рис.3). Для ее определения на карте проводят линию водораздела и измеряют ограниченную ей площадь планиметром, в компьютерной среде (ГИС, КРЕДО и др. компьютерные программы), а при ориентировочных расчетах – палеткой.

*Длина водосбора (L)* измеряется по карте как расстояние по прямой от устья реки (или от замыкающего створа) до самой удаленной точки водосбора (рис. 4). В случае изогнутости бассейна прямая (AD) заменяется ломаной (ACE), каждый отрезок которой повторяет главные изгибы русла.



Рисунок 3 – Водосбор реки Кара-Ункур.

Отбивка бассейна проводится по водораздельным линиям

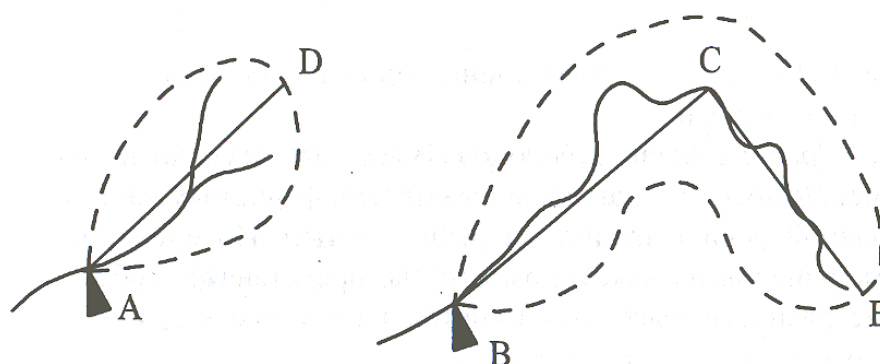


Рисунок 4 – Определение длины водосбора ( $L$ ) при обычной и изогнутой форме водосбора

**Средняя ширина водосбора ( $V_{cp}$ )** определяется делением площади водосбора  $F$  на его длину  $L$ :

$$V_{cp} = F/L. \quad (1)$$

**Средняя высота водосбора** (относительно уровня моря) является одной из важнейших морфометрических характеристик, особенно в горных районах, так как она в неявном виде характеризует основные составляющие водного баланса, а также другие характеристики водного режима. Для определения средней высоты водосбора используется топографическая карта, на которой всегда нанесены изолинии высот местности (*горизонтали*).

Вначале определяются частные площади водосбора, заключенные между горизонталями (рис. 5), строится график распределения площадей водосбора по высотным зонам (рис. 6), а затем находится ее средняя высота, которая вычисляется по формуле:

$$H_{cp} = \frac{f_1 H_1 + f_2 H_2 + \dots + f_n H_n}{F} \quad (2)$$

где  $H_{cp}$  – средняя высота водосбора, м;  $f_1, f_2, \dots, f_n$  – частные площади водосбора, заключенные между горизонталями, км<sup>2</sup>;  $H_1, H_2, \dots, H_n$  – средние высоты между горизонталями, м;  $F$  – общая площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

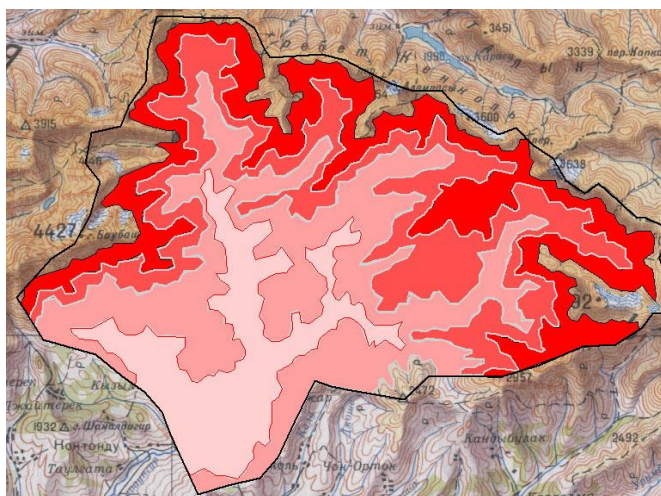


Рисунок 5 – Частные площади  $f_i$  заключенные между горизонталями

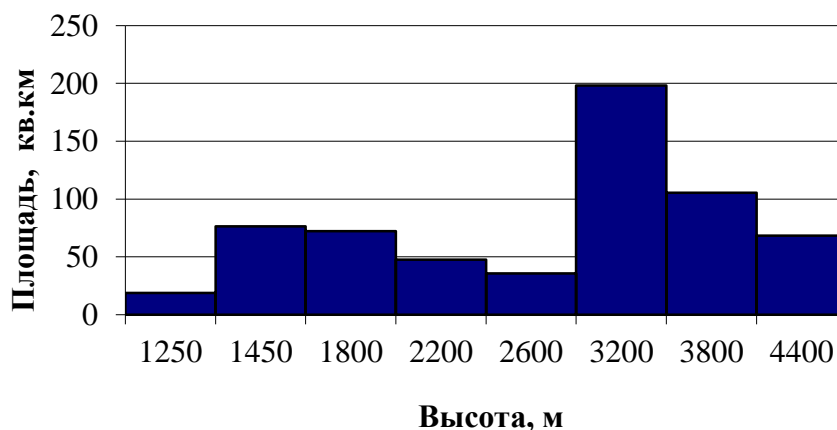


Рисунок 6 – График распределения площадей водосбора по высотным зонам

*Коэффициенты залесенности  $f_z$ , заболоченности  $f_b$  и озерности  $f_{oz}$*  используются довольно часто, так как леса, озера и болота могут оказывать существенное влияние на

режим реки. Указанные коэффициенты характеризуют процентную долю площади лесов, болот и озер от общей площади водосбора  $F$ :

$$f_l = F_l / F \cdot 100\%, \quad f_b = F_b / F \cdot 100\%, \quad f_{oz} = F_{oz} / F \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $F_l, F_b, F_{oz}$  – соответственно площади заняты лесами, болотами и озерами.

*Средний уклон водосбора.* Высотные отметки на водосборе уменьшаются по направлению от периферийных частей к руслу главной реки и от истока реки к устью. Интенсивность этого уменьшения на некотором отрезке представляет собой отношение разности высотных отметок на отрезке к длине этого отрезка.

На реальных речных водосборах уклон существенно меняется по площади, поэтому его значение можно определить для отдельных относительно однородных участков и затем, с учетом доли каждого участка, осреднить для водосбора в целом. Средний уклон водосбора ( $i_e$ ) вычисляется по формуле:

$$i_e = [0.5(l_0 + l_n) + l_1 + l_2 + l_{n-1}] \Delta H / F \quad (4)$$

где  $l_0, l_1, l_2, \dots, l_n$  – длины горизонталей в пределах водосбора, км;  $\Delta H$  – сечение горизонталей, км;  $F$  – площадь водосбора.

Анализируя формулу (4), можно отметить, что основной вклад в величину  $i_e$  вносят уклоны речных склонов, так как на них приходится основная доля площади водосбора, влияние же уклона речного русла сказывается в гораздо меньшей степени.

*Средний уклон водосбора оказывает большое влияние на скорость стекания дождевых и талых вод по склонам водосбора и поэтому влияет на максимальные расходы воды, продолжительность паводков и половодий, склоновую эрозию и сток наносов.*

На рис.7 показан речной бассейн с выделенными частными водосборами притоков. Показаны и бесприточные пространства, где вода стекает по поверхности водосбора непосредственно в главную реку.

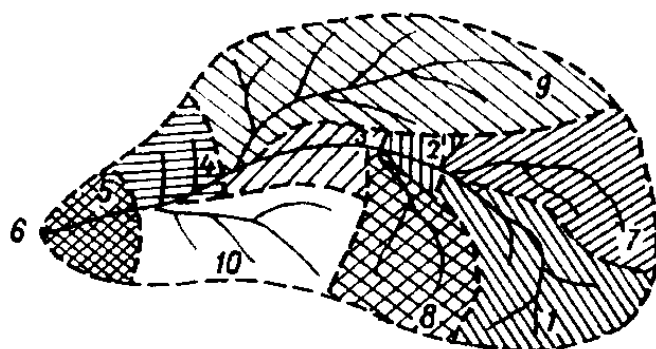


Рисунок 7 – Схема речного бассейна

1,4,7,8,9,10 – притоки и их водосборные площади; 2,3,5 – бесприточные пространства;  
6 – замыкающий створ

### Задание

1. Определить по рис. 2, к какому гидрологическому бассейну относится Ваша река.
2. Отбить площадь водосбора реки.
3. Определить (вычислить) площадь водосбора реки  $F$  (км<sup>2</sup>).
4. Измерить длину ( $L$ ), (км) и среднюю ширину водосбора  $B_{cp.}$ , (км)
5. Выделить частные площади водосбора по топокарте (см. рис. 5). Вычислить среднюю площадь водосбора  $H_{cp.}$ . Данные к вычислению средней высоты водосбора привести в форме табл. 1. Обратите внимание, что расчет площадей водосбора начинаем с нижних высот водосбора, т.е. от замыкающего створа реки.

Таблица 1 – Расчетные данные к вычислению средней высоты водосбора реки .....

№, п/п	Высота водосбора, м	Площадь водосбора $f_i$ , соответствующая высоте		Средние высоты между горизонталями, $h_i, м$	$f_i \cdot h, м^3$
		км <sup>2</sup>	м <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5	6
1	1200-1300	18,2	18200000	1250	22750000000
2	1300-1600	76,5	76500000	1450	1,10925*10 <sup>11</sup>
3	1600-2000	72	72000000	1800	1,296*10 <sup>11</sup>
4	2000-2400	47,5	47500000	2200	1,045*10 <sup>11</sup>
5	2400-2800	35	35000000	2600	91000000000
6	2800-3600	198,2	198,2*10 <sup>6</sup>	3200	6,3424*10 <sup>11</sup>
7	3600-4000	105	105*10 <sup>6</sup>	3800	3,99*10 <sup>11</sup>
8	4000-4800	68	68000000	4400	2,992*10 <sup>11</sup>

По данным табл.1. строится график распределения площадей по высотным зонам (см. рис. б), и берутся данные для определения средней высоты бассейна/водосбора реки.

б. Оценить по расчетам площадей по высотным зонам, на какие высоты приходится основная площадь бассейна, на какие меньшая?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТ ГОДОВОГО СТОКА РЕКИ ПРИ НАЛИЧИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

**Цель задания:** Усвоить терминологию статистических характеристик:  $Q_0$ ,  $K_i$ ,  $C_v$ , и методику определения нормы стока  $Q_0$ , модульных коэффициентов  $K_i$ , построение разностной интегральной кривой, расчета коэффициента вариации  $C_v$ .

**Исходные данные:** Данные среднегодовых расходов воды за многолетний период для конкретной реки Кыргызской Республики. Данные для каждой реки приведены в папке «База данных КР» (диск D папка «База данных КР»). Численные значения расходов воды представлены в программе Excel для удобства последующих расчетов.

### **Общие сведения:**

Расчет величины среднего многолетнего стока  $Q$ , являющегося основной характеристикой водности реки и исходной базой для водохозяйственных расчетов, может быть произведен с достаточной точностью только при наличии длинного ряда наблюдений. Вычисленное по малому ряду лет среднее значение стока, является неустойчивым и существенно изменяется при увеличении числа лет наблюдений.

Вероятность и размер возможных изменений зависит от степени изменчивости годового хода, характеризуемой коэффициентом вариации  $C_v$ . Чем больше величина  $C_v$ , тем менее устойчивым является среднее значение годового стока и тем большее число лет необходимо для получения такого значения, которое бы заметно не менялось с увеличением ряда наблюдений.

Необходимо учитывать, что если для реки, имеющей коэффициент вариации годового стока  $C_v=0,15$ , минимальное число лет наблюдений, необходимое для вычисления среднего многолетнего значения стока с величиной средней ошибки равной  $\pm 5\%$  составит 9 лет, то для реки, имеющей  $C_v=0,60$ , число лет наблюдений, необходимых для этих вычислений с той же точностью, составит 144 года.  $C_v$  характеризует многолетнюю изменчивость стока и зависит от распределения осадков, испарения, размера водосбора, озерности, характера слагающих водосбор грунтов, степени зарегулированности стока водохранилищами и многих других факторов.  $C_v$  подчиняется широтной и высотной зональности (осадки, температура воды и др.). Так для рек Мурманской области  $C_v > 0,1$ , Казахстана  $C_v > 1,0$ . Реки озерного и снего-ледникового питания обычно имеют малые

значения  $C_v \approx 0,1 \dots 0,2$ . Для малых рек изменчивость стока, а, следовательно, и значение  $C_v$  обычно более значительны, чем для больших рек.

Для вычисления средней многолетней величины стока рек, который определяется в основном климатическими факторами, широко применяется метод географической интерполяции, основанный на построении карт изолиний многолетнего стока, выраженного в значениях модуля стока ( $л/с \cdot км^2$ ) или слоя стока (мм). Первая наиболее подробная карта для территории СССР была составлена в 1946 г. Б.Д. Зайковым. Для Кыргызстана такая карта создана В.А. Кузмиченком (институт водных проблем и гидроэнергетики НАН КР).

В районах, слабоосвещенных изолиниями стока, при недостаточности или отсутствии наблюдений наиболее надежным способом решения задачи является метод гидрологической аналогии, который заключается в определении гидрологических характеристик бассейна и находится в аналогичных физико-географических условиях с исследуемым бассейном. В данном методе очень важен обоснованный выбор аналога, его нельзя выбирать только по близости географического расположения. Необходимо сопоставить данные о водосборах по основным факторам: рельефу, развитию гидрографической сети, почвенно-геологическим условиям, уклону местности, заболоченности, озерности и др. Следует отметить, что бассейн, принятый за аналог при расчетах среднемноголетнего стока и максимальных расходов, не всегда может быть использован как аналог при расчете внутригодового распределения и минимального стока.

Для вычисления среднемноголетнего стока применяются также эмпирические формулы, в которых используется зависимость между стоком и отдельными метеорологическими элементами (осадками, дефицитом влажности и т.п.), а также уравнения водного баланса.

В колебаниях годового стока наблюдается определенная цикличность, проявляющаяся в последовательной смене групп многоводных и маловодных рек, и *среднеарифметическое из многолетнего ряда наблюдений считается нормой только в том случае, если ряд состоит из полных циклов колебаний водности реки.*

*Цикл – сочетание многоводных, маловодных и средних по водности лет. Включение в расчетный период наблюдений только многоводной фазы дает преувеличение, только маловодной фазы – преуменьшение нормы стока.*

Расчетный (репрезентативный) период устанавливается во всех случаях, когда продолжительность наблюдений не превышает 50 – 60 лет. Он включает наибольшее число законченных циклов, состоящих из групп многоводных и маловодных лет. Принимаются во внимание лишь основные продолжительные циклы, распространяющиеся на большие территории и охватывающие все реки данного района.

Цикличность колебаний стока и расчетный период для определения нормы стока устанавливаются с помощью разностных суммарных кривых годового стока (рис. 1).

Для построения такой кривой последовательно суммируют отклонения модульных коэффициентов от среднего значения, равного единице.

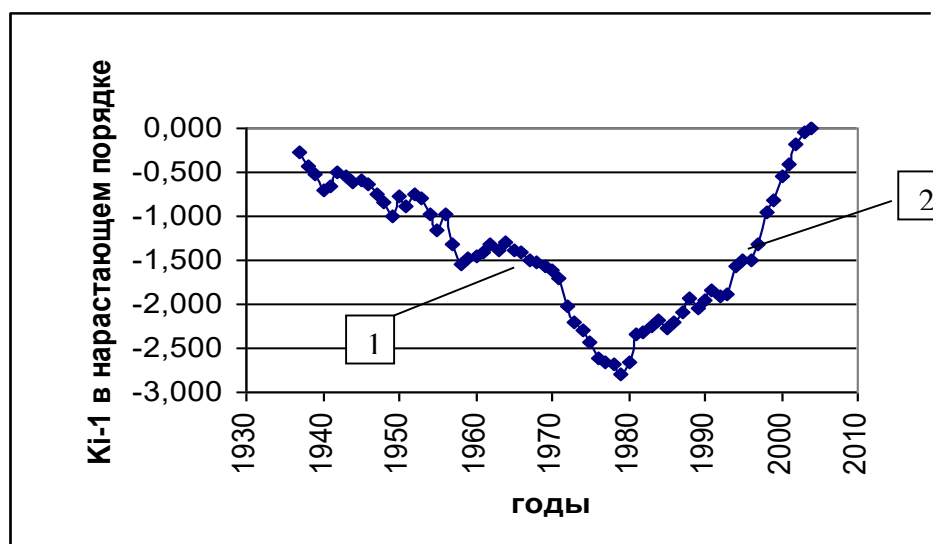


Рисунок 1 – Разностная интегральная кривая р. Джууку, гидропост Устье р. Джуукучак:  
1 – маловодная фаза, 2 – многоводная фаза

Иначе, разностная интегральная кривая (РИК) представляет собой график зависимости

$$\Sigma(K_i-1)=f(T), \tag{1}$$

Возможен расчет с учетом коэффициента вариации  $C_v$ :

$$\Sigma(K_i-1)/C_v=f(T), \tag{2}$$

где  $K_i$  – модульный коэффициент, определяемый по формуле

$$K_i=Q_i/Q_{on} \tag{3}$$

где  $T$  – время (годы).

$K_i$  – модульный коэффициент;

$Q_i$  – средний расход за конкретный год, м<sup>3</sup>/с;

$Q_{on}$  – норма стока за n-летний период, м<sup>3</sup>/с.

$C_v$  – коэффициент вариации, определяемый по формуле

$$C_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2 / (n - 1)} \tag{4}$$

$n$  – количество лет наблюдений.

Следует учесть, если число лет наблюдений  $n \leq 30$  годам, то в знаменателе формулы (4) принимаем  $n-1$ . Если же число лет наблюдений  $n \geq 30$ , то в знаменателе формулы (4) принимаем  $n$ .

Используя разностную интегральную кривую, можно определить водность реки за любой интервал времени.

Наиболее удобно строить суммарные кривые в относительных величинах – модульных коэффициентах  $K$ . Расчеты удобно привести в форме табл. 1 (расчеты выполнить в Excel).

### Задание

1. Изучить по лекциям терминологию статистических характеристик стока:  $Q_0$ ,  $K_i$ ,  $C_v$ ,
2. Составить шапку таблицы в Excel.

Таблица 1– Определение нормы стока  $Q_0$ , вычисление коэффициентов интегральной кривой  $K_i$ , определение коэффициента вариации  $C_v$

№№	Годы	Средне-годовые расходы, $Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	Средний многолетний расход $Q_{0n} = \sum Q_i / n$ , м <sup>3</sup> /с	Модульный коэффициент $K_i = Q_i / Q_{0n}$	$K_i - 1$	Сумма $K_i - 1$ в нарастающем порядке	$(K_i - 1)^2$	Коэффициент вариации $C_v$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2005	13,12	8,29	1,58	0,58	0,58	0,336	0,19
2	2006	8,89		1,07	0,07	0,58+0,07=0,65	0,049	
3	2007	9,91		1,19	0,19	0,65+0,19=0,84	0,036	
т.д.	Т.д.	Т.д.		Т.д.	Т.д.	Т.д.		
							$\Sigma =$	

3. По исходным данным – среднегодовым характеристикам стока реки  $Q_i$  за многолетний период (данные в отдельном файле в формате Excel), определить среднее многолетнее значение годового стока реки  $Q_{cp.} = \sum Q_i / n$ , где  $n$  – количество лет наблюдений.
4. Определить модульные коэффициенты  $K_i = Q_i / Q_0$  (полагаем что  $Q_{cp.} = Q_0$ ).
5. Для построения разностной интегральной (суммарной) кривой стока найти значения  $K_i - 1$ , затем рассчитать величины  $K_i - 1$  в нарастающем порядке: первый член ряда  $K_1 - 1$ , второй член ряда  $(K_1 - 1) + (K_2 - 1)$ , третий член ряда  $(K_1 - 1) + (K_2 - 1) + (K_3 - 1)$  и т.д.
6. По графам Годы и Сумма  $K_i - 1$  в нарастающем порядке построить интегральную кривую, которая нам покажет, достаточен и репрезентативен ли ряд наблюдений,

*выбранный нами, т.е. есть ли полные циклы колебания водности. Проанализируйте полученную кривую, есть ли в наличии циклы водности, если таковые присутствуют, то можно приступит к расчету коэффициента вариации стока.*

7. Для расчета коэффициента вариации  $C_v$  возвести в квадрат значения  $K_i-1$  и определить сумму значений  $\Sigma(K_i-1)^2$
8. Расчет коэффициента вариации при наличии данных наблюдений выполняют по формуле (4), причем, если ряд наблюдений более 30 лет ( $n>30$ ), то в знаменателе формулы ставится  $n$ , *если же число лет наблюдений менее 30 лет ( $n<30$ ), ставим число равное  $n-1$ .*
9. По сумме графы  $(K_i-1)^2$  определяем  $C_v$  и записываем в последнюю графу таблицы.
10. Строим график разностной интегральной кривой своей реки в соответствии с рис. 1.

## РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ГОДОВОГО СТОКА РЕКИ ПРИ НАЛИЧИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

**Цель задания:** Знать определение распределения обеспеченности или продолжительности годового стока за  $n$  (ряд) лет, знать определение кривой распределения частоты или повторяемости годового стока за  $n$  (ряд) лет.

Научиться строить эмпирическую кривую обеспеченности.

Уметь определять данные для построения теоретической кривой обеспеченности стока, уметь ее строить при наличии данных наблюдений.

**Исходные данные:** Коэффициент вариации  $C_v$ , (расчет выполнен в практической работе № 3), данные среднегодовых расходов воды за многолетний период для реки, таблица Рыбкина-Фостера.

### **Общие сведения:**

Производя оценку водности реки, необходимо установить статистическую закономерность колебания стока во времени, что определяется путем применения метода математической статистики с последующим построением кривых распределения стока (для графической наглядности).

**Кривые распределения стока:** 1) кривая распределения частоты или повторяемости годового стока за  $n$  (ряд) лет; 2) кривая распределения обеспеченности или продолжительности годового стока за  $n$  (ряд) лет.

Продолжительностью или обеспеченностью гидрологической величины называется вероятность того, что рассматриваемое ее значение не может быть превышено полученной процентной величины.

Для установления **эмпирической обеспеченности** членов ограниченного ряда, которая бы в большей мере отвечала теоретической обеспеченности, предложено несколько формул. Одна из них формула Н.Н. Чегодаева (для средних расходов):

$$P = \frac{m-0,3}{n+0,4} \quad (1)$$

где  $p$  – обеспеченность, % ( это вероятность того, что рассматриваемое ее значение

может быть превышено, т.е. быть не ниже заданного);

$m$  – порядковый номер убывающего члена ряда;

$n$  – общее число членов ряда.

Формула основана на предположении, что рассматриваемый период по своей водности занимает медианное положение среди других периодов. *Эта формула* дает запас (занижение) в нижней части кривой обеспеченности и *рекомендуется при расчетах годового, сезонного и минимального стока.*

Так как данных наблюдений не достаточно для полного анализа режима реки в многолетнем разрезе, нет данных по обеспеченности 1%, 3%, 5% и др. данных по обеспеченности малых процентов, необходимо строить теоретическую кривую обеспеченности.

Для построения **теоретической кривой обеспеченности**, которая бы соответствовала эмпирической кривой, необходимо по данным наблюдений вычислить значения параметров ее дифференциального уравнения и произвести его интегрирование.

Практически для построения теоретической кривой обеспеченности и вычисления расходов различной обеспеченности достаточно установить 3 следующих параметра: 1) среднюю многолетнюю величину (норму) стока  $Q_{0n}$ , которая, будучи выражена в относительных единицах – модульных коэффициентах  $K_i$ , равна единице; 2) коэффициент вариации  $C_v$  (вычислено в предыдущей работе); 3) коэффициент асимметрии  $C_s$ . Для вычисления коэффициента асимметрии  $C_s$ , характеризующего асимметричность кривой распределения годового стока, требуется весьма значительный ряд наблюдений, которым редко располагают. Поэтому почти всегда  $C_s$  определяют по отношению коэффициента вариации  $C_v$  к коэффициенту асимметрии  $C_s$ . Применительно к расчету годовых колебаний стока для горных рек Кыргызстана величину коэффициента асимметрии рекомендуется принимать равной  $2C_v$ . Это соотношение в некоторых случаях может быть нарушено. Так, для рек засушливых районов СНГ значения  $C_v \approx C_s$  или равны нулю, а иногда могут быть отрицательными. Озерные и горные реки имеют нередко  $C_s = 2C_v$  и  $C_s > 2C_v$ . Следует отметить, что на практике колебания годового стока рассчитываются в зависимости от целей проектирования для различной процентной обеспеченности в пределах 50-99%.

По этим параметрам можно построить теоретическую кривую обеспеченности годового стока по следующей формуле:

$$K_{p\%} = \Phi_{p\%} \times C_v + 1, \quad (2)$$

где  $K_{p\%}$  – модульный коэффициент, соответствующей обеспеченности стока;

$\Phi_{p\%}$  – функция Фостера – отклонение ординаты кривой обеспеченности от среднего модульного коэффициента  $K=1$  при  $C_v=1$ . Принимается по табл. С.И. Рыбкина - Фостера (Приложение 1).

При необходимости величины  $K_{p\%}$  переводят в расходы:

$$Q_{p\%} = Q_0 * K_{p\%} \quad (3)$$

### Задание

11. Изучить по лекциям терминологию статистических характеристик стока:  $Q_0$ ,  $Q_{p\%}$ ,  $K_{p\%}$ ,  $C_v$ ,  $C_s$

12. Составить таблицу по аналогии с приведенной ниже для среднегодовых расходов изучаемой реки. В графе 4 ранжировать (выстроить) расходы по убыванию (с большего к меньшему). Следить за тем, чтобы годы соответствовали своим расходам.

Таблица 1 – Вычисление обеспеченности средних годовых расходов воды р. Паратунки у п. Гейзер за 1961-2012 гг.

Годы в хронологическом порядке	$Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	В порядке убывания расхода		Обеспеченность, $p$ , %
		годы	$Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	
1	2	3	4	5
1961	...	1989	Max Q	
1962	...	...	...	
1963	...	...	...	
...	...	...	...	
...	...	...	...	
2012	...	1976	Min Q	
$n=31$	...	$n=31$		

13. Обеспеченность рассчитать по формуле Н.Н. Чегодаева (1).

14. По данным граф 4 и 5 в *Excel* строится эмпирическая кривая обеспеченности средних годовых расходов воды (рис. 1).

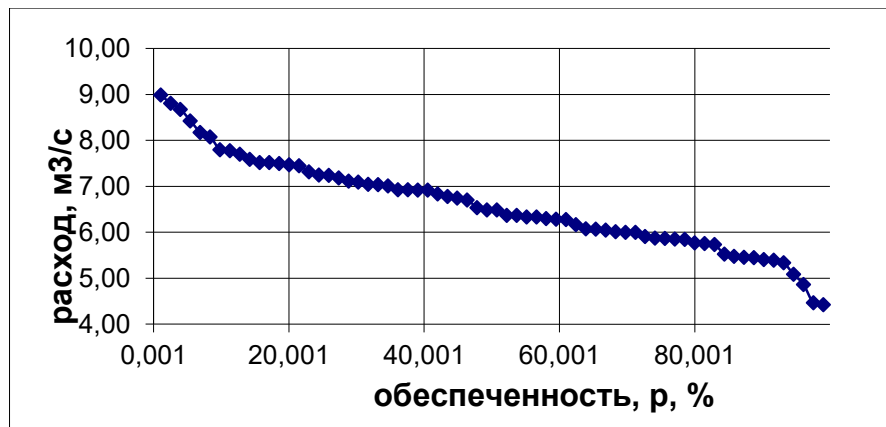


Рисунок 1 – Эмпирическая кривая обеспеченности средних расходов  
р. (название реки)

Затем горизонтальную шкалу  $P\%$  делаем логарифмической (рис. 2):

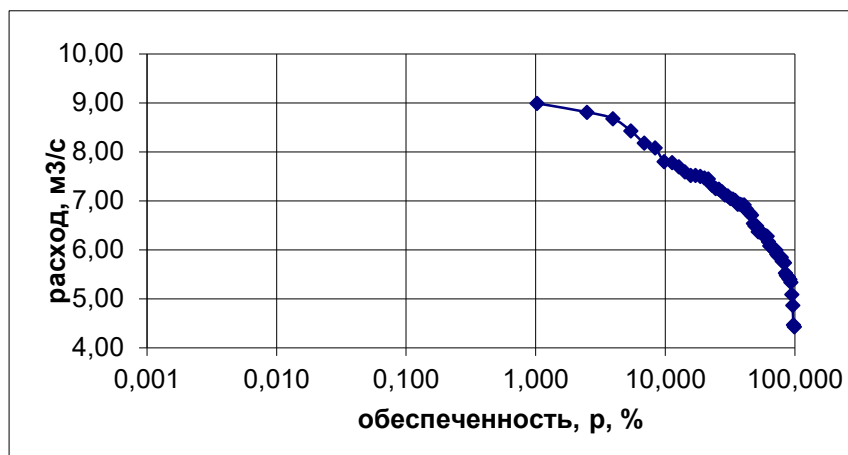


Рисунок 2 – Эмпирическая кривая обеспеченности средних расходов  
р. (название реки) (шкала  $P\%$  логарифмическая)

Такое преобразование шкалы необходимо, чтобы были видны значения расходов воды малой обеспеченности. На рис. 2 видим, что данных по расходу малой обеспеченности нет. Поэтому необходимо строить эмпирическую кривую обеспеченности.

15. Для построения теоретической кривой обеспеченности первоначально принимаем значение  $C_S=2C_V$  (Приложение 1). И по таблице Рыбкина-Фостера в соответствии с расчетной величиной коэффициента асимметрии  $C_S$  определяем функцию Фостера  $\Phi_{p\%}$  разной процентной обеспеченности. Далее в соответствии с формулой (2) рассчитываем модульные коэффициенты  $K_{p\%}$  и расходы  $Q_{p\%}$  заданной обеспеченности. Расчеты сводим в табл. 2.

Таблица 2 – Вычисление ординат теоретической кривой обеспеченности годовых и расходов  $p$ . .....  $Q_0 =$  м<sup>3</sup>/с;  $C_V =$  ;  $C_S =$  ;  $F =$  км<sup>2</sup>

Расчетные величины	Обеспеченность $p$ , %												
	0,0 1	0,1	1	3	5	...	...	...	...	и т.д.	99	99, 9	
$\Phi_{p\%}$													
$\Phi_{p\%} * C_V$													
$K_{p\%} = \Phi_{p\%} * C_V + I$													
$Q_{p\%} = Q_0 * K_{p\%}$													

Выполняя расчеты табл. 2 необходимо обязательно вычислить значения расхода с вероятностью  $p=0,01\%$ ,  $0,1\%$ ,  $1\%$ ,  $50\%$ ,  $75\%$ ,  $90\%$ .

Если значение  $C_S$  не кратно  $0,1$  ( $0,32$ ,  $0,24$ , и т.д.), то необходимо интерполировать значения функции Фостера  $\Phi_{p\%}$ , выбираемые из Приложения 1. Например:  $C_S=0,24$ :

Для обеспеченности  $p=0,01\%$   $C_S=0,2 - \Phi = 4,16$ ;  $C_S=0,3 - \Phi = 4,38$ , разница между значениями  $C_S=0,1$ , что соответствует  $\Phi_{p\%} = 4,38 - 4,16 = 0,22$ .

Составляем пропорцию  $0,1 - 0,2$

$$0,04 - x$$

$$x = 0,088$$

Значение  $\Phi = 4,16 + 0,088 = 4,248$

Построение кривых обеспеченности выполняют на клетчатке вероятностей (иначе горизонтальная ось  $P, \%$  логарифмическая). Ниже приведен пример выполнения построения кривых обеспеченности (рис.3).

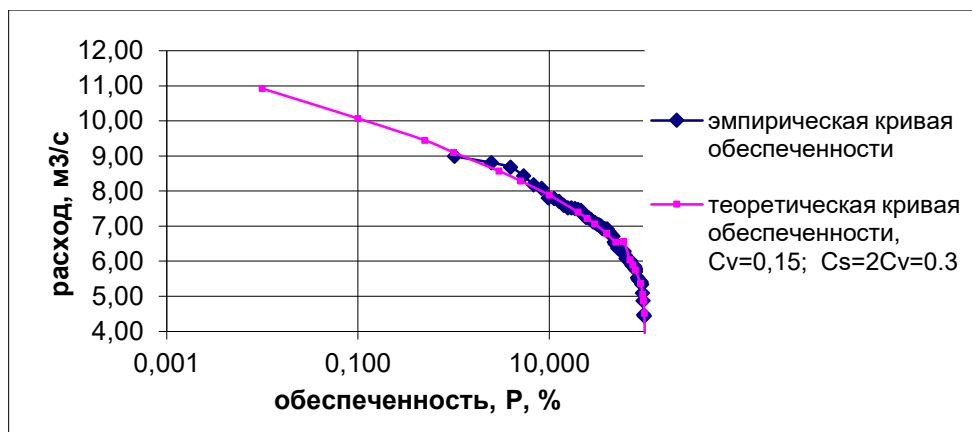


Рисунок 3 – Кривые обеспеченности среднегодового стока реки .....

Если при построении на графиках кривые эмпирической и теоретической вероятностей не совпадут, то необходимо изменить величину  $C_s$  и повторить расчет и построение.

Для примера на рис. 4 приведены три кривые. Треугольниками даны точки эмпирической кривой. При расчете теоретической кривой, соответствующей эмпирической было сделано несколько расчетов, и была выбрана кривая, наиболее совпадающая с точками эмпирической кривой. На рис. 4 ее точки нанесены квадратами, она соответствует  $C_s=6C_v$ .



Рисунок 4 – Кривые обеспеченности максимального годового стока реки .....

16. *При оформлении графиков и таблиц не забывайте указывать название реки и гидропост, где проведены гидрологические наблюдения.*

Приложение 1. Нормированные отклонения от среднего значения

C <sub>4</sub>	Нормированные отклонения $\Phi(p, C_4)$											
	0,01	0,1	0,5	1	3	5	10	20	25	30	40	50
0,00	3,72	3,09	2,57	2,33	1,88	1,64	1,28	0,84	0,67	0,52	0,25	0,00
0,10	3,94	3,23	2,68	2,40	1,92	1,67	1,29	0,84	0,66	0,51	0,24	-0,02
0,20	4,16	3,33	2,78	2,47	1,96	1,70	1,30	0,83	0,65	0,50	0,22	-0,03
0,30	4,38	3,52	2,89	2,54	2,00	1,72	1,31	0,82	0,64	0,48	0,20	-0,05
0,40	4,61	3,66	2,98	2,61	2,04	1,75	1,32	0,82	0,63	0,47	0,19	-0,07
0,50	4,83	3,81	3,08	2,68	2,08	1,77	1,32	0,81	0,62	0,46	0,17	-0,08
0,60	5,05	3,96	3,17	2,75	2,12	1,80	1,33	0,80	0,61	0,44	0,16	-0,10
0,70	5,28	4,10	3,27	2,82	2,15	1,82	1,33	0,79	0,59	0,43	0,14	-0,12
0,80	5,50	4,24	3,36	2,89	2,18	1,84	1,34	0,78	0,58	0,41	0,12	-0,13
0,90	5,73	4,38	3,45	2,96	2,22	1,86	1,34	0,77	0,57	0,40	0,11	-0,15
1,00	5,96	4,53	3,53	3,02	2,25	1,88	1,34	0,76	0,55	0,38	0,09	-0,16
1,10	6,18	4,67	3,61	3,09	2,28	1,89	1,34	0,74	0,54	0,36	0,07	-0,18
1,20	6,41	4,81	3,70	3,15	2,31	1,91	1,34	0,73	0,52	0,35	0,05	-0,19
1,30	6,64	4,95	3,78	3,21	2,34	1,92	1,34	0,72	0,51	0,33	0,04	-0,21
1,40	6,87	5,09	3,86	3,27	2,37	1,94	1,34	0,71	0,49	0,31	0,02	-0,22
1,50	7,09	5,23	3,93	3,33	2,39	1,95	1,33	0,69	0,47	0,30	0,00	-0,24
1,60	7,31	5,37	4,02	3,39	2,42	1,96	1,33	0,68	0,46	0,28	-0,02	-0,25
1,70	7,54	5,50	4,10	3,44	2,44	1,97	1,32	0,66	0,44	0,26	-0,03	-0,27
1,80	7,76	5,64	4,17	3,50	2,46	1,98	1,32	0,64	0,42	0,24	-0,05	-0,28
1,90	7,98	5,77	4,24	3,55	2,49	1,99	1,31	0,63	0,40	0,22	-0,07	-0,29
2,00	8,21	5,91	4,30	3,60	2,51	2,00	1,30	0,61	0,39	0,20	-0,08	-0,31
2,10	8,44	6,04	4,36	3,65	2,53	2,01	1,29	0,59	0,37	0,18	-0,10	-0,32
2,20	8,67	6,17	4,42	3,68	2,54	2,02	1,27	0,57	0,35	0,16	-0,12	-0,33
2,30	8,90	6,30	4,48	3,73	2,57	2,03	1,26	0,55	0,32	0,14	-0,13	-0,34
2,40	9,13	6,43	4,54	3,78	2,60	2,04	1,25	0,52	0,29	0,12	-0,14	-0,35
2,50	9,36	6,56	4,60	3,82	2,62	2,05	1,23	0,50	0,27	0,10	-0,16	-0,36
2,60	9,59	6,69	4,66	3,86	2,63	2,06	1,21	0,48	0,25	0,08	-0,17	-0,37
2,70	9,82	6,82	4,72	3,92	2,64	2,07	1,19	0,46	0,24	0,07	-0,18	-0,38
2,80	10,05	6,95	4,78	3,96	2,65	2,08	1,18	0,44	0,22	0,05	-0,20	-0,39
2,90	10,28	7,08	4,84	4,01	2,66	2,09	1,15	0,41	0,20	0,04	-0,21	-0,39
3,00	10,51	7,21	4,90	4,05	2,67	2,10	1,13	0,39	0,19	0,03	-0,22	-0,40
3,10	10,74	7,34	4,96	4,09	2,68	2,11	1,11	0,37	0,17	0,02	-0,23	-0,40
3,20	10,97	7,47	5,02	4,13	2,69	2,12	1,09	0,35	0,15	-0,01	-0,24	-0,41

ординат биномиальной кривой обеспеченности  $\frac{K_p - \bar{K}}{\sigma} = \frac{K_p - 1}{C_0} = \Phi(p, C_4)$

при обеспеченности p %										
60	70	75	80	90	95	97	99	99,9	$\Phi^{-1}(p)$	$\frac{K_p - \bar{K}}{\sigma}$
-0,25	-0,52	-0,67	-0,84	-1,28	-1,64	-1,88	-2,33	-3,09	3,28	0,00
-0,27	-0,53	-0,68	-0,85	-1,27	-1,61	-1,84	-2,25	-2,95	3,28	0,03
-0,28	-0,55	-0,69	-0,85	-1,26	-1,58	-1,79	-2,18	-2,81	3,28	0,06
-0,30	-0,56	-0,70	-0,85	-1,24	-1,55	-1,75	-2,10	-2,67	3,27	0,08
-0,31	-0,57	-0,71	-0,85	-1,23	-1,52	-1,70	-2,03	-2,54	3,27	0,11
-0,33	-0,58	-0,71	-0,85	-1,22	-1,49	-1,66	-1,96	-2,40	3,26	0,14
-0,34	-0,59	-0,72	-0,85	-1,20	-1,45	-1,61	-1,88	-2,27	3,25	0,17
-0,35	-0,60	-0,72	-0,85	-1,18	-1,42	-1,57	-1,81	-2,14	3,24	0,20
-0,37	-0,60	-0,73	-0,85	-1,17	-1,38	-1,52	-1,74	-2,02	3,22	0,22
-0,38	-0,61	-0,73	-0,85	-1,15	-1,35	-1,47	-1,66	-1,90	3,21	0,25
-0,39	-0,62	-0,73	-0,85	-1,13	-1,32	-1,42	-1,59	-1,79	3,20	0,28
-0,41	-0,62	-0,74	-0,85	-1,10	-1,28	-1,38	-1,52	-1,68	3,17	0,31
-0,42	-0,63	-0,74	-0,84	-1,08	-1,24	-1,33	-1,45	-1,58	3,16	0,34
-0,43	-0,63	-0,74	-0,84	-1,06	-1,20	-1,28	-1,38	-1,48	3,14	0,37
-0,44	-0,64	-0,73	-0,83	-1,04	-1,17	-1,23	-1,32	-1,39	3,12	0,39
-0,45	-0,64	-0,73	-0,82	-1,02	-1,13	-1,19	-1,26	-1,31	3,09	0,42
-0,46	-0,64	-0,73	-0,81	-0,99	-1,10	-1,14	-1,20	-1,24	3,07	0,45
-0,47	-0,64	-0,72	-0,81	-0,97	-1,06	-1,10	-1,14	-1,17	3,04	0,48
-0,48	-0,64	-0,72	-0,80	-0,94	-1,02	-1,06	-1,09	-1,11	3,01	0,51
-0,48	-0,64	-0,72	-0,79	-0,92	-0,98	-1,01	-1,04	-1,05	2,98	0,54
-0,49	-0,64	-0,71	-0,78	-0,90	-0,95	-0,99	-1,00	-1,00	2,95	0,57
-0,50	-0,64	-0,70	-0,76	-0,867	-0,914	-0,930	-0,945	-0,952	2,92	0,59
-0,50	-0,64	-0,69	-0,75	-0,842	-0,882	-0,895	-0,905	-0,909	2,89	0,62
-0,50	-0,63	-0,68	-0,74	-0,816	-0,850	-0,859	-0,867	-0,870	2,86	0,64
-0,51	-0,62	-0,67	-0,72	-0,792	-0,820	-0,827	-0,832	-0,833	2,82	0,67
-0,51	-0,62	-0,66	-0,71	-0,768	-0,790	-0,795	-0,799	-0,800	2,79	0,69
-0,51	-0,61	-0,66	-0,70	-0,746	-0,763	-0,766	-0,769	-0,769	2,76	0,72
-0,51	-0,61	-0,65	-0,68	-0,724	-0,736	-0,739	-0,740	-0,741	2,74	0,74
-0,51	-0,60	-0,64	-0,67	-0,703	-0,711	-0,713	-0,714	-0,714	2,71	0,76
-0,51	-0,60	-0,63	-0,65	-0,681	-0,688	-0,689	-0,690	-0,690	2,68	0,78
-0,51	-0,59	-0,62	-0,64	-0,661	-0,665	-0,667	-0,667	-0,667	2,67	0,80
-0,51	-0,58	-0,60	-0,62	-0,641	-0,644	-0,645	-0,645	-0,645	2,62	0,81
-0,51	-0,57	-0,59	-0,61	-0,622	-0,625	-0,625	-0,625	-0,625	2,59	0,83

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПРИ НАЛИЧИИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

**Цель задания:** Знать формулы для определения эмпирической обеспеченности максимальных и минимальных расходов воды. Научиться строить эмпирическую кривую обеспеченности, уметь определять данные для построения теоретической кривой обеспеченности стока, уметь ее строить при наличии данных наблюдений для максимальных и минимальных расходов. Понимать, расходы какой обеспеченности  $P\%$  необходимо рассчитывать для проектирования энергетических объектов, объектов ирригационного назначения, для водоснабжения.

**Исходные данные:** данные максимальных расходов воды за многолетний период для реки, данные минимальных расходов воды за многолетний период для реки, таблица Рыбкина-Фостера.

### **Общие сведения:**

При водохозяйственном планировании, строительном и энергетическом проектировании, которые предусматривают естественный или видоизмененный режим речного стока, необходимо знать не только среднюю величину (норму) стока, но и сток маловодных и многоводных лет, а также пределы возможных колебаний годового стока в будущем многолетнем периоде.

Если бы колебания стока имели определенную периодичность и был бы известен закон колебаний, то по имеющимся данным наблюдений можно было бы установить хронологический ход стока на заданный будущий период времени и определить, когда будет наблюдаться та или иная величина стока или сколько раз за это время годовой сток превысит то или иное значение. Но такая задача пока неразрешима. Поэтому расчеты годового стока и других его характеристик представляются в виде количественной оценки отвечающей той или иной заданной обеспеченности или повторяемости - в среднем один раз в  $N$  лет без указания срока наступления расчетной величины.

Обеспеченностью гидрологической величины называется вероятность того, что рассматриваемое ее значение может быть превышено. При этом различают:

- вероятность превышения для явлений, наблюдаемых только один раз в году;

- вероятность превышения среди совокупности всех возможных значений для явлений, которые могут наблюдаться несколько раз в году;
- вероятность превышения в рассматриваемом пункте или на рассматриваемой территории в любом пункте.

Вероятность служит мерой оценки достоверности появления того или иного значения рассматриваемой характеристики или явления.

Различают теоретическую вероятность ( $\lim m/n=p$ ) и эмпирическую вероятность или частность ( $m/n$ ), выявляемую из наблюдений частоты появления благоприятных случаев, составляющих очень длинный ряд.

Для установления эмпирической обеспеченности членов ограниченного ряда, которая бы в большой мере отвечала теоретической обеспеченности, предложено несколько формул, среди них формулы:

С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля

$$p=(m/(n+1))100\% \quad (1)$$

Н.Н. Чегодаева

$$p=((m-0,3)/(n+0,4))100\% \quad (2)$$

Формула (1) выведена в предположении, что используемый в расчетах ряд, охватывающий  $n_i$  – летний период, среди других  $n$ –летних периодов, составляющих генеральную совокупность, характеризуется повышенной водностью высоких расходов и пониженной низких. Она дает некоторый запас (завышение) в верхней части кривой обеспеченности и рекомендуется для расчетов максимальных расходов.

Формула (2) основана на предположении, что рассматриваемый  $n_i$  – летний период по своей водности занимает медианное положение среди других  $n$ –летних периодов. Эта формула дает запас (занижение) в нижней части кривой обеспеченности и рекомендуется при расчетах годового, сезонного и минимального стока.

#### ***Расчет максимальных расходов воды заданной обеспеченности.***

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

Под максимальными расходами талых и дождевых вод понимают наибольшие в каждом году значения мгновенных или срочных расходов во время прохождения половодья или дождевых паводков на реках и временных водотоках.

В настоящее время расчетные максимальные расходы определяют в соответствии с МСП 3.04-101-2005 (Межгосударственный свод правил по проектированию и

строительству. **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК.** Determination of design hydrological performance. МСП 3.04-101-2005, [http://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=30099725#sub\\_id=15](http://online.zakon.kz/Document/?doc_id=30099725#sub_id=15))

При этом в качестве критерия принимают ежегодную вероятность превышения (обеспеченность)  $P\%$  расчетных максимальных расходов (табл. 1).

Таблица 1 – Ежегодная вероятность превышения (%) расчетных максимальных расходов

Расчетный случай	Класс гидротехнического сооружения			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Поверочный	0,01	0,1	0,5	1,0

Временные гидротехнические сооружения рассчитывают на пропуск максимального расхода обеспеченностью 10%.

Расчетные максимальные расходы годовых максимумов устанавливают отдельно для талых и дождевых вод, учитывая их различное генетическое происхождение (фазовую неоднородность). Из двух полученных значений для проектных целей выбирают наибольшее или то, которое приводит к наиболее неблагоприятным условиям работы сооружения.

Расчетные максимальные расходы талых и дождевых вод (как и другие расчетные характеристики стока) при наличии данных гидрометрических наблюдений находят с помощью аналитических кривых обеспеченностей. Для расчетов используют, как правило, кривую трехпараметрического гамма-распределения. При достаточном обосновании допускается использовать биномиальную кривую обеспеченности (при  $C_s > 2C_v$ ).

Параметры указанных аналитических кривых – среднее значение  $Q$ , коэффициент вариации  $C_v$  и коэффициент асимметрии  $C_s$  максимальных расходов и построение кривых обеспеченностей выполняют по методике, приведенной в практической работе 3 и 4.

Расчетную обеспеченность  $P\%$  принимают в зависимости от класса проектируемого гидротехнического сооружения.

При проектировании сооружений I класса к максимальному расходу обеспеченностью 0,01%, полученному с помощью аналитической кривой обеспеченности, прибавляют гарантийную поправку  $\Delta Q_{0.01\%}$ , то есть исправленный расход

$$Q'_{0.01\%} = Q_{0.01\%} + \Delta Q_{0.01\%} \quad (3)$$

Гарантийная поправка

$$\Delta Q_{0.01\%} = \frac{\alpha E_{p\%}}{\sqrt{n}} Q_{0.01\%} \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий гидрологическую изученность рек; принимают равным 1,0 для гидрологически изученных рек, а для слабоизученных – 1,5;  $n$  – число лет наблюдений;  $E_{p\%}$  – величина, характеризующая случайную среднеквадратическую ошибку максимального расхода воды обеспеченностью  $p=0,01\%$ , определяемая по графику  $E_p=f(C_{v \max})$ . (рис. 1).

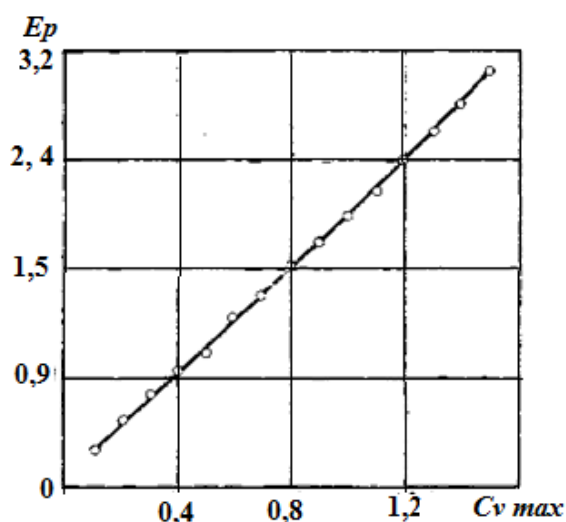


Рисунок 1 – Ошибка  $E_p$  максимального расчетного расхода обеспеченностью 0,01% при разных значениях коэффициента вариации значениях коэффициента  $C_{s \max}$

Гарантийную поправку  $\Delta Q_{0,001\%}$  принимают в размере не более 20% максимального расхода  $Q_{0,001\%}$ . Расчетный максимальный расход с учетом поправки должен быть не менее наибольшего наблюдаемого расхода воды.

#### **Расчет минимального стока.**

При наличии длительных, наблюдений расчетные минимальные расходы воды находят так же, как и расчетные годовые и максимальные расходы (по данным наблюдений).

При значительных расхождениях аналитической кривой и фактических данных наблюдений применяют эмпирические кривые вероятностей превышения. Расчетные минимальные расходы вычисляют отдельно для зимнего и летне-осеннего сезона. К ним относятся минимальный среднесуточный, минимальный среднемесячный и минимальный 30-суточный расходы.

Для южных районов СНГ, в том числе и для Кыргызской Республики, используют минимальный 30-суточный некалендарный сток, который вычисляют по гидрографу за непрерывные 30 суток с наименьшим в году стоком.

### Задание

17. Изучить материалы лекции «Характерные расходы воды».

18. По аналогии с выполнением задания в практической работе № 3 рассчитать коэффициент вариации  $C_v$ . Для расчета выбрать данные – максимальные расходы воды (не средние). Учесть, что нормы для максимальных, да и для минимальных расходов не существует (только для средних расходов вычисляется). Поэтому табл. 1 (пр. раб. №3) будет представлена в виде:

Таблица 2– Определение среднемноголетнего расхода воды  $Q_{ср.макс}$ , определение коэффициента вариации  $C_{v.макс}$

№ №	Год ы	Максим альные ха год расход ы, $Q_i$ , $м^3/с$	Средний многолетн ий расход $Q_{ср.макс}=\sum$ $Q_i/n$ , $м^3/с$	Модуль ный коэффи циент $K_i=Q_i/Q$ <i>оп</i>	$K_i-1$	$(K_i-1)^2$	Коэффицие нт вариации $C_v$
1	2	3	4	5	6	7	8
1							
2							
3							
т.д.						$\sum=$	

19. Составить таблицу по аналогии с приведенной ниже для максимальных расходов изучаемой реки. В графе 4 выстроить расходы по убыванию с большего к меньшему, следить за тем, чтобы годы соответствовали своим расходам. Обеспеченность рассчитать по формуле С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля (2).

20. По данным граф 4 и 5 строится **эмпирическая кривая** обеспеченности максимальных годовых расходов воды (см. пример построения рис. 1, рис. 2. пр.р. № 4).

21. Затем строим теоретическую кривую обеспеченности (порядок расчета в работе № 4, рис. 3). Если в расчете первая теоретическая кривая не будет соответствовать

эмпирической кривой обеспеченности, меняем значение  $C_s$  и вновь повторяем расчеты, вторую и третью (если понадобится) кривые наносим на график. Это необходимо, чтобы проанализировать режим максимальных расходов данной реки.

Таблица 3 – Вычисление обеспеченности максимальных годовых расходов воды р. ....

Годы в хронологическом порядке	$Q_{i, \max}$ м <sup>3</sup> /с	В порядке убывания расхода		Обеспеченность, $p$ , %
		годы	$Q_{i, \max}$ м <sup>3</sup> /с	
1	2	3	4	5
1961	...	1989	max	
1962	...	...	...	
1963	...	...	...	
...	...	...	...	
...	...	...	...	
2012	...	1976	min	
$n=31$	...	$n=31$		

22. Расчет коэффициента вариации минимального стока выполняем в соответствии с табл. 2 данной практической работы.

Расчет и построение эмпирической и теоретической кривых обеспеченности минимального стока ведем в соответствии с табл. 3, приведенной для максимальных расходов, и пункта 5 данной практической работы. Не забывайте, что обеспеченность  $P\%$  минимальных расходов рассчитывается по формуле Н.Н. Чебодаева (2).

23. ***При оформлении графиков и таблиц не забывайте указывать название реки и гидропост, где проведены гидрологические наблюдения.***

**Расчет и построение батиграфических кривых водохранилища.  
Определение минимального уровня воды в водохранилище – УМО**

**Цель задания:** Построение батиграфических (топографических) характеристик водохранилища. Определение параметров будущего водохранилища.

**Исходные данные:** глубины  $H$ , площадь зеркала  $\Omega$  по слоям  $\Delta H$ , рассчитанные по топографическому плану района затопления будущего водохранилища.

**Общие сведения:** В гидрологической практике при выборе места для чаши будущего водохранилища используют топографические планы. Выбор местоположения створа плотины определяется наиболее узким местом между склонами, то есть там, где горизонтали наиболее близко расположены друг к другу. Наметив створ плотины, по плану определяют контур затопления. Далее рассчитывают топографические – батиграфические характеристики водохранилища.

Батиграфические характеристики представляют собой графическое изображение зависимостей площади водохранилища  $\Omega$  и его объема  $V$  от высотных отметок или глубин  $H$ , соответствующих различным уровням наполнений:  $V=V(H)$  – кривая объемов,  $\Omega=\Omega(H)$  – кривая площадей,  $h_{cp} = h_{cp}(H)$  – кривая средних глубин и  $L = L \Omega(H)$  – кривая критерия литорали.

Определение этих характеристик проводят путем обработки топографических планов района затопления (рис. 1). При этом для каждого проектируемого гидроузла составляют характеристики для разных вариантов створов и на основе технико-экономических расчетов выбирают оптимальный вариант. На рис. 1 сечение горизонталей  $h=2$  м, но все горизонтали не показан, чтобы не загромождать рисунок. Показаны только горизонтали дна и поверхности будущего водохранилища.

Кривая площадей строится по результатам планиметрирования плана в горизонталях планиметром, в программе AutoCAD, либо в GIS программах.

*Объемы, площади зеркала и уровни, вычисленные при допущении горизонтальности, называются статическими.*

Для упрощения изложения материала исходные данные приведены в табл. 1, порядок расчета и его результаты приведены на конкретном примере и показаны в табл. 2, и соответствующие расчету графические зависимости на рис. 2.

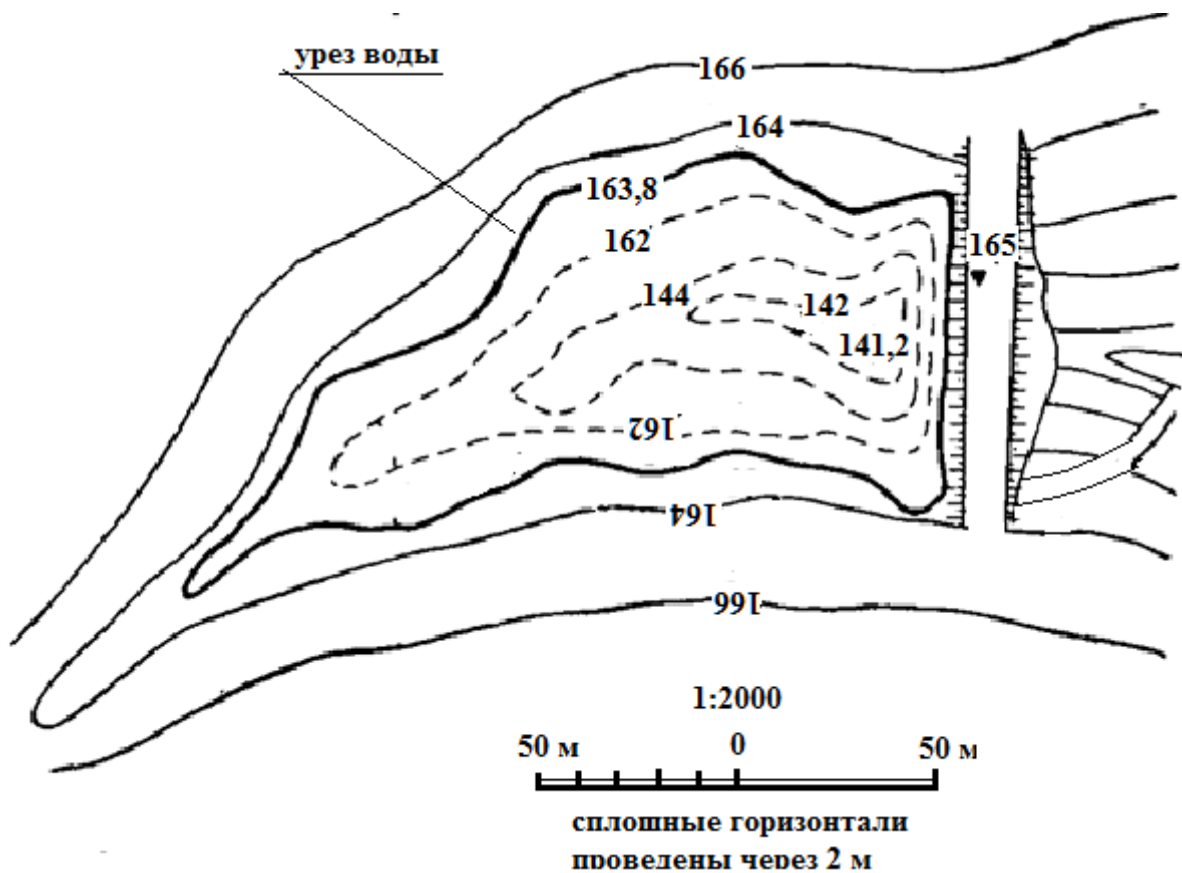


Рисунок 1 – План проектируемого водохранилища

Таблица 1 – Исходные данные для расчета емкости водохранилища

Отметка поверхности воды Н, м	142	144	146	148	150	152	154	156	158	160	162	164
(дно вдхр.)												
Площадь зеркала $\Omega$ , $\text{м}^2$	0	4	12	20	30	42	56	74	94	118	146	184

Таблица 2 – Расчет батиграфических кривых водохранилища

Отметка поверхности воды $H$ , м	Площадь зеркала $\Omega$ , м <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкости, млн.м <sup>3</sup>		Средняя глубина $h_{cp}$ , м	Литораль $L$	
			Слоя $\Delta V$	$V$		Площадь $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	Критерий $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
142	0			0	0	0	–
		2	4				
144	4			0+4=4	4:4=1	4-0=4	4:4=1
		2	16				
146	12			4+16=20	20:12=1,66	12-4=8	8:12=0,67
		2	32				
148	20			20+32=52	52:20=2,6	20-12=8	8:20=0,4
		2	50				
150	30			52+50=102	102:30=3,4	30-20=10	10:30=0,33
		2	72				
152	42			174	4,14	12	0,29
		2	98				
154	56			272	4,86	14	0,25
		2	130				
156	74			402	5,43	18	0,24
		2	168				
158	94			570	6,06	20	0,21
		2	212				
160	118			582	4,93	24	0,20
		2	264				
162	146			1046	7,16	28	0,19
		2	330				
164	184			1376	7,48	38	0,21

Графа 4: Для установления зависимости  $V=f(H)$  определяем объемы по слоям:

$$\Delta V = \frac{\Omega_i + \Omega_{i+1}}{2} \times \Delta H, \quad (1)$$

где  $\Omega_i, \Omega_{i+1}$  – площади зеркала водохранилища при отметках  $H_i$  и  $H_{i+1}$ ;

объем первого от дна параболоида предлагается считать

$$\Delta V_1 = 2/3 \Omega_i \times \Delta H_{0-1}. \quad (2)$$

Графа 5: Объем воды в водохранилище при любой отметке уровня наполнений вычисляется путем последовательного суммирования объемов отдельных слоев, начиная с самой низкой точки,

$$V_i = \sum_0^i \Delta V \quad (3)$$

То есть получается расчет интегральной кривой, кривой нарастания объемов от дна к поверхности водохранилища. В табл.2 стрелки указывают порядок расчета.

Графа 6: Для построения *кривой средних глубин* водохранилища  $h_{cp}$  определяют средние глубины при различных уровнях наполнений, как:

$$h_{cp} = \frac{V_i}{\Omega_i} \quad (4)$$

Графа 7: *Площадь литорали* – это площадь мелководья с глубинами 2м и менее.

Площадь литорали определяют:

$$\Omega_L = \Omega_H - \Omega_{H-2} \quad (5)$$

где  $\Omega_H$  – площадь зеркала водохранилища при отметке уровня  $H$ , м;

$\Omega_{H-2}$  – площадь зеркала водохранилища при отметке на два метра ниже, то есть  $H-2$  м.

Графа 8: *Критерий литорали* – это отношение площади литорали к площади зеркала водохранилища при этой же отметке:

$$L_{\Omega} = \frac{\Omega_L}{\Omega_H} \quad (6)$$

В отличие от формы кривых  $V=V(H)$ ,  $\Omega=\Omega(H)$ ,  $h_{cp}=h_{cp}(H)$ , которые имеют тенденцию к повышению от дна водохранилища к его поверхности, кривая критерия литорали  $L = L_{\Omega}(H)$  получается в виде ломаной линии, направленной сверху вниз.

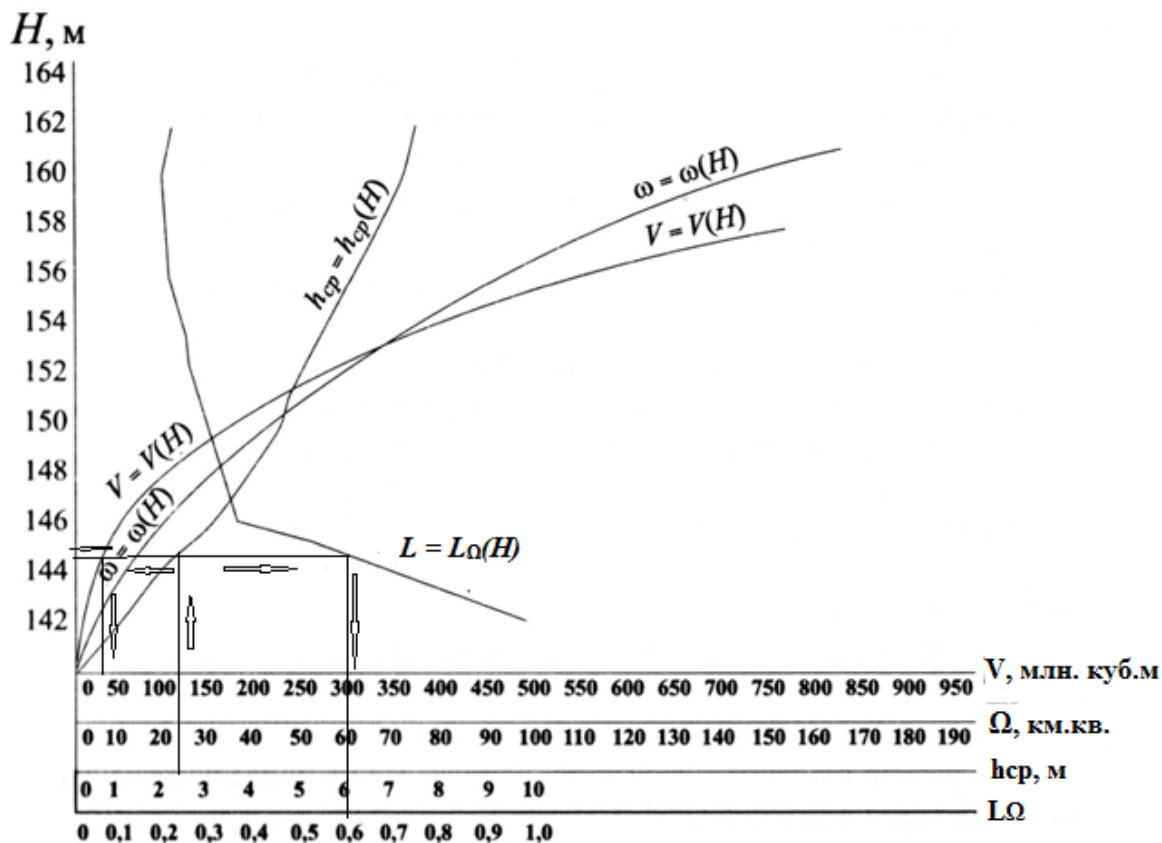


Рисунок 2 – Батиграфические кривые водохранилища (показан расчет  $V_{умо}$  при  $h_{cp}=2,5$ м)

## Определение мертвого объема водохранилища

*Мёртвый объём водохранилища* – несрабатываемая в нормальных условиях эксплуатации часть ёмкости водохранилища, ограниченная сверху горизонтом (уровнем) мертвого объема (УМО). Мёртвый объем не участвует в регулировании стока, но имеет большое практическое значение. Величина мертвого объема определяется расчетами заиления, санитарно-техническими требованиями и другими водохозяйственными соображениями. Допуская гибкость в будущих изменяющихся условиях работы сооружений, мёртвый объем нередко делится на две части. Верхняя часть при необходимости может быть в дальнейшем сработана (что предусматривается заложением водозаборных отверстий) или опорожнена. Нижняя часть, ограниченная сверху уровнем дна водоспуска, не может быть ни сработана, ни опорожнена. Частота случаев сработки водоема до горизонта мертвого объема зависит от степени регулирования и режима речного стока. При регулировании стока только в пределах года сработка до горизонта мертвого объема или до близких к нему уровней происходит почти ежегодно. При регулировании, охватывающем целый период маловодных лет, сработка до горизонта мертвого объема происходит только в конце таких периодов, т. е. редко. Основным фактором при выборе мертвого объема является отложение наносов.

Итак, мертвый объем определяют из ряда условий: а) санитарно-технических; б) заиления; в) условия обеспечения командования над оросительными каналами; г) напора на ГЭС; д) судоходства; е) рыбоводства.

Вычисляем мертвый объем водохранилища  $V_{умо}$  и соответствующий ему уровень воды  $H_{умо}$  из условий выполнения санитарно-технических требований, обеспечения необходимого качества воды. Для расчета используем батиграфические кривые (рис. 2).

По санитарно-техническим условиям для обеспечения нормального качества воды и глубины нормами предусмотрено: средняя глубина воды в водохранилище при минимальном его наполнении должна быть не менее 2,5м ( $h_{cp} \geq 2,5м$ ); а критерий литорали не более 0,35 ( $L_{\Omega} \leq 0,35$ ).

По кривой  $h_{cp} = h_{cp}(H)$ , находим при  $h_{cp} = 2,5м$  уровень  $H = 145м$  абс;

Соответственно этой отметке объем воды в водохранилище  $V_{умо} = 38$  млн.м<sup>3</sup>;

Используя кривую  $L = L_{\Omega}(H)$ , устанавливаем, что при уровне воды  $H = 145м.$ ,  $L_{\Omega} = 0,61$ , что больше чем 0,35.

Если  $L_{\Omega} \leq 0,35$ , то качество воды хорошее;

Если  $0,3 < L_{\Omega} \leq 0,35$  – качество воды удовлетворительное;

Если  $L_{\Omega} > 0,35$  – качество воды неудовлетворительное.

В нашем случае получается, что вода в водохранилище при данном мертвом объеме неудовлетворительного качества. Следовательно, требуется снизить критерий литорали до  $L_{\Omega}=0,35$  и необходимо выполнить обвалование берегов водохранилища (рис.3).

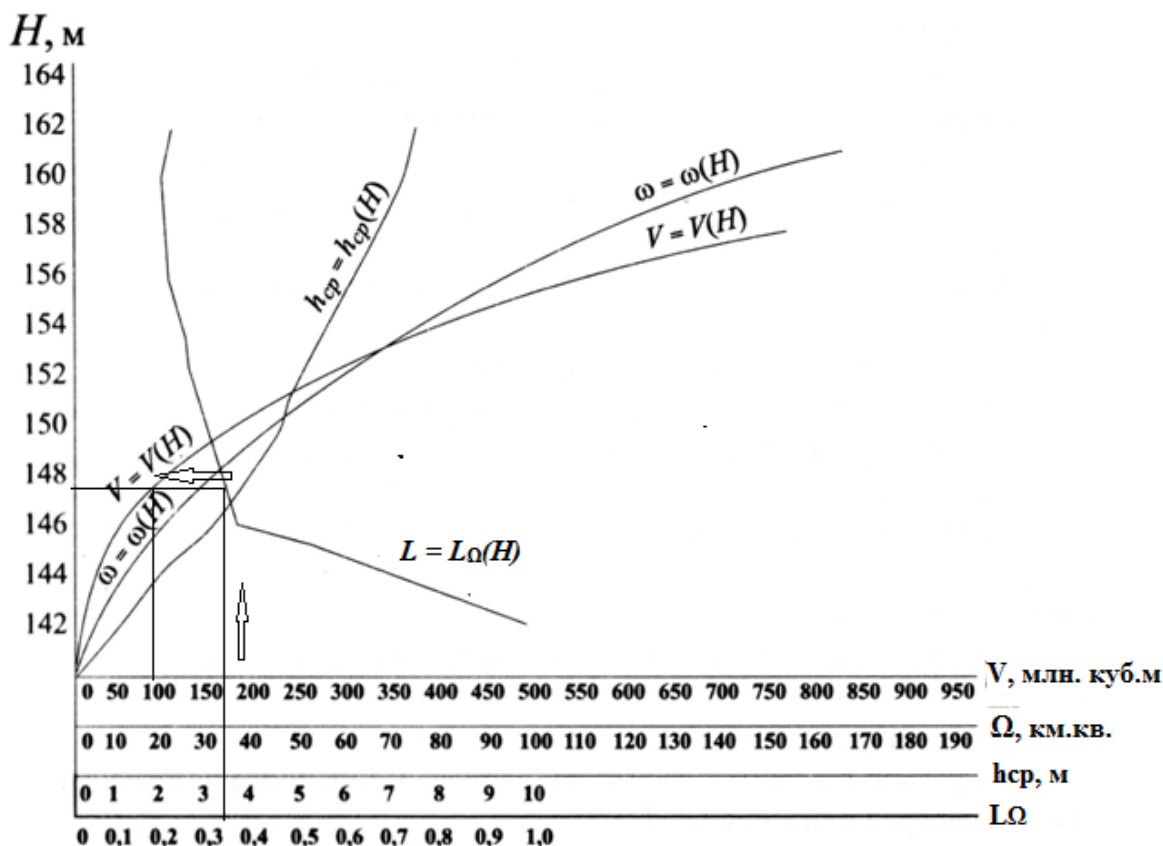


Рисунок 3 – Батиграфические кривые водохранилища (показан расчет  $V_{умо}$  при  $L_{\Omega}=0,35$ )

Задаем  $L_{\Omega}=0,35$  и определяем соответственно мертвый объем водохранилища  $V_{умо}=110$  млн.м<sup>3</sup> при отметке мертвого объема  $H=147$ м, средняя глубина  $h_{cp}=3,5$ м (рис. 3). Это и будет окончательное решение поставленной задачи.

### Задание

1. Проработать теоретический материал практической работы.
2. По индивидуальному заданию (см. варианты заданий ниже), построить батиграфические характеристики водохранилища.
3. Используя батиграфические характеристики определить минимальный уровень воды в водохранилище и мертвый объем, исходя из санитарно-технических условий и качества воды.

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 1

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , $\text{км}^2$	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. $\text{м}^3$		Средняя глубина, $h_{\text{ср.}}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	$V$		площадь, $\Omega_L$ , $\text{км}^2$	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
142	0						
144	2						
146	6						
148	12						
150	21						
152	31						
154	43						
156	60						
158	78						
160	100						
162	128						
164	159						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 2

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
136	0						
138	6						
140	14						
142	26						
144	40						
146	58						
148	76						
150	98						
152	126						
154	164						
156	206						
158	252						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 3

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
130	0						
132	3						
134	3						
136	14						
138	22						
140	334						
142	346						
144	462						
146	680						
148	126						
150	160						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 4

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
150	0						
152	10						
154	22						
156	38						
158	56						
160	76						
162	98						
164	124						
166	152						
168	188						
170	230						
172	278						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 5

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
156	0						
158	14						
160	28						
162	44						
164	62						
166	82						
168	102						
170	126						
172	152						
174	184						
176	220						
178	264						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 6

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
152	0						
154	12						
156	26						
158	40						
160	56						
162	72						
164	92						
166	112						
168	134						
170	162						
172	196						
174	236						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 7

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
260	0						
262	12						
264	26						
266	40						
268	56						
270	72						
272	92						
274	112						
276	134						
278	162						
280	196						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 8

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
220	0						
222	10						
224	26						
226	40						
228	56						
230	76						
232	98						
234	124						
236	158						
238	190						
240	230						
242	280						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 9

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
220	0						
222	10						
224	26						
226	40						
228	56						
230	76						
232	98						
234	124						
236	158						
238	190						
240	230						
242	280						

Расчет батиграфических кривых водохранилища.

Вариант 10

Отметка поверхнос. воды, Н, м	Площадь зеркала, $\Omega$ , км <sup>2</sup>	Разность $\Delta H$ , м	Емкость, млн. м <sup>3</sup>		Средняя глубина, $H_{ср.}$ , м	Литораль	
			слоя, $\Delta V$	V		площадь, $\Omega_L$ , км <sup>2</sup>	критерий , $L_\Omega$
1	2	3	4	5	6	7	8
142	0						
144	6						
146	28						
148	44						
150	60						
152	76						
154	108						
156	124						
158	148						
160	200						
162	2580						
164	290						

## Практическая работа № 7

### НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДИНАМИКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОХРАНИЛИЩА И ИХ РАСЧЕТ

**Цель задания:** Знать основные характеристики водохранилища, уметь рассчитать приток воды в водохранилище, водопотребление ГЭС, объем водохранилища, сброс с водохранилища на конец каждого месяца года.

**Исходные данные:** Данные внутригодового распределения стока реки 95% обеспеченности за многолетний период. Численные значения расходов воды представлены в программе Excel для удобства последующих расчетов.

#### **Общие сведения**

Техническая эксплуатация водохранилища осуществляется специальной эксплуатационной службой, в задачи которой входят: *оперативное управление водными ресурсами водохранилища*. Эксплуатационный персонал гидроузла ведет постоянный учет притока и расходования воды из водохранилища, наблюдения за состоянием водохранилища и гидротехнических сооружений, руководствуясь при этом соответствующими инструкциями и наставлениями.

Для гидрометрического и гидрометеорологического обслуживания на водохранилище оборудуют гидрологические посты и станции. К основным гидрометрическим сооружениям относятся *гидрологический пост во входном створе водохранилища* и *посты на боковых притоках*. На водохранилищах большой протяженности устанавливают несколько постов. Сведения о наличном объеме воды за каждый период определяют по среднему уровню водохранилища.

Расход воды из водохранилища учитывают при помощи *тарированных сооружений* или установленных на них водомеров.

Гидрометеорологическую информацию (*долгосрочные и краткосрочные прогнозы максимальных уровней и дат их прохождения, прогнозы вскрытия и установления ледостава, данные о водном и тепловом балансе водохранилища и т. д.*) служба эксплуатации крупных водохранилищ получает от Кыргызгидромета и Минводхоза. На малых водохранилищах, эксплуатируемых в интересах только одной хозяйственной организации, наблюдения и обобщение всех гидрометеорологических материалов по водохранилищу ведут органы эксплуатации.

Основное отличие водохранилища от естественного водоема (озера, пруда) заключается в его возможности регулирования (перераспределения) речного стока и уровня режима. Регулирование стока – это процесс перераспределения его водохранилищем в соответствии с требованиями водохозяйственного комплекса (энергетика, водоснабжение, орошение, судоходство, борьба с наводнениями, рыбное хозяйство и т.п.). Период аккумуляции речного стока называется наполнением водохранилища, а период отдачи наполненной воды – сработкой водохранилища.

На рис. 1 представлены характерные уровни и объемы воды в водохранилище. Нормальным подпорным уровнем (НПУ) называется максимальный уровень воды, при котором все сооружения гидроузла могут работать сколь угодно длительно. Объем водохранилища при отметке НПУ называется полным объемом. Минимальный уровень водохранилища, до которого возможна его сработка при нормальной эксплуатации, называется уровнем мертвого объема (УМО). Ниже этого уровня возможна лишь аварийная сработка водохранилища.

Объем воды между НПУ и УМО называется полезным, так как этот объем используется при регулировании стока в нормальных условиях эксплуатации. Объем воды, находящийся ниже УМО, называется мертвым, так как он не используется в нормальных условиях эксплуатации.

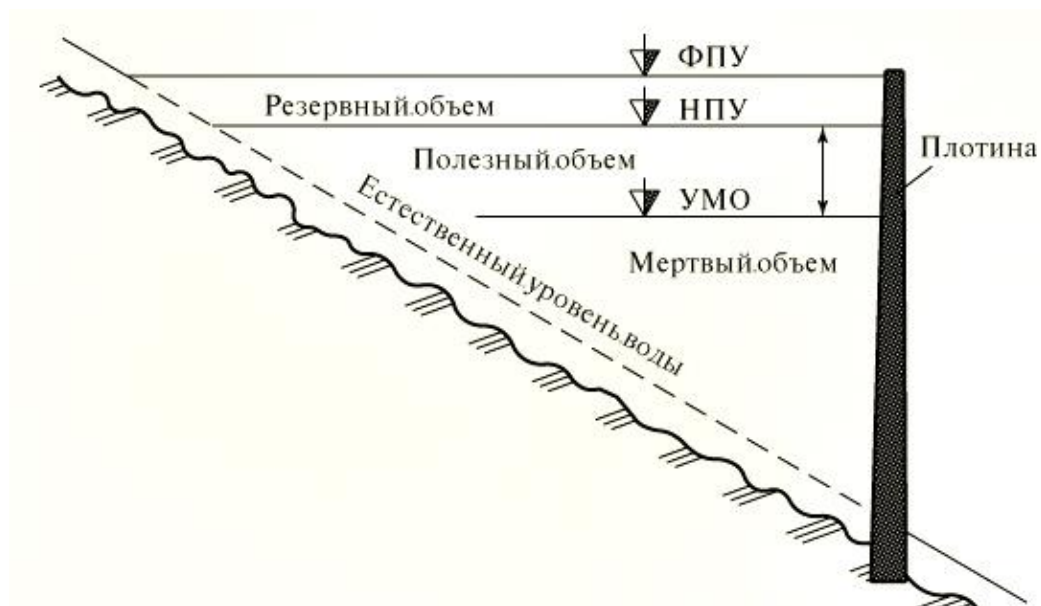


Рисунок 1 – Характеристика водохранилища

При прохождении расхода очень редкой повторяемости (катастрофический паводок), существенно превышающего пропускную способность ГЭС и водосбросных

сооружений, уровень воды в водохранилище повышается выше НПУ. Максимально возможный уровень воды в водохранилище по условиям надежности сооружений называется форсированным подпорным уровнем (ФПУ). Объем водохранилища между отметками ФПУ и НПУ называется резервным. Он используется только для трансформации (срезки) половодий редкой повторяемости. Резервный объем должен быть сработан до НПУ сразу же по прошествии половодья.

Полный объем водохранилища при НПУ равен сумме полезного и мертвого объемов. Между отметками НПУ и ФПУ размещается резервный объем водохранилища, который используется для приема и трансформации половодий и паводков редкой повторяемости. Сумма рабочего, резервного и мертвого объемов дают полный объем водохранилища при ФПУ.

К основным видам регулирования стока в водохранилище относят многолетнее, годовичное, недельное и суточное.

Степень зарегулированности стока определяется относительной емкостью водохранилища (коэффициентом емкости  $\beta$ ), который определяется отношением полезного объема водохранилища к среднему за многолетний период объему годового стока в створе плотины:

$$\beta = \frac{V_{\text{пол}}}{W_B} \quad (1)$$

В современных условиях всякое гидротехническое сооружение, связанное с регулированием речного стока, имеет комплексное назначение. Так, водохранилища гидроэлектростанции, кроме регулирования стока для энергетических целей, обычно используются и для водохозяйственных целей – ирригации, судоходства, водоснабжения и т. п. Имеется ряд объектов, в основном преследующих водохозяйственные цели, а энергетические задачи решаются попутно.

Различают регулирование водно-энергетическое и водохозяйственное. Водно-энергетическое регулирование осуществляет перераспределение стока для энергетических целей. Оно позволяет получить требуемый режим мощности ГЭС и режим выработки электроэнергии. Мощность ГЭС является функцией не только расхода, но и напора, поэтому процесс водно-энергетического регулирования связан с учетом того и другого. При водохозяйственном регулировании напор не является регулируемым параметром и

регулирується лише расход. В цьому стоїть основне відміння водно-енергетического регулювання від водохозяйственного. При регулюванні стока водохранилищем його отдача по воде или мощности гарантируется с определенной обеспеченностью, под которой понимается относительное число случаев, когда отдача больше или равна заданной. Обеспеченность выражается в процентах от общего числа случаев и определяется по данным ряда наблюдений.

При любом регулировании потребители воды в некоторые периоды времени работают с расходом воды, превышающим приток, а в другие периоды времени расходуют воды меньше притока. В первом случае происходит сработка водохранилища, во втором – наполнение.

*Промежуток времени от начала какого-либо одного периода сработки водохранилища от НПУ до начала следующего после очередного его полного заполнения называется циклом регулирования.* В период всего цикла ведутся гидрологические наблюдения за уровнем воды в водохранилище, поступающем расходе воды, определяются объемные характеристики.

Рассмотрим цикл регулирования водохранилища длиной в 1 год. Если после сработки и очередного наполнения водохранилища всегда имеются холостые сбросы, то регулирование называется сезонным (неполным годовым) в отличие от годового (полного), когда в условиях расчетной обеспеченности сбросов нет. Как и при сезонном регулировании, так и при годовом в каждом следующем году циклы сработки и наполнения повторяются.

Объем водохранилища годового регулирования, обычно составляет от 10 до 30% среднемноголетнего объема годового стока реки, т. е.  $\beta_{год}=0,10-0,30$ . При этом большее значение  $\beta_{год}$  соответствует большему коэффициенту изменчивости стока  $C_v$ . Водохранилище годового регулирования может, как это обычно и бывает, одновременно выполнять и краткосрочное регулирование (суточное и недельное).

На рис. 2, а представлена общая схема годового регулирования, а на рис.2, б – сезонного (имеется период сброса излишков воды во время половодья). На этих рисунках также представлены соответствующие режимы верхнего бьефа. Ясно, что в особо маловодные годы или при слишком больших (сверхрасчетных) изъятиях стока половодья водохранилище может и не наполниться до отметки НПУ. Нетрудно представить себе, как будет изменяться уровень верхнего бьефа  $Z_{вб}$ , расход ГЭС  $Q_{ГЭС}$ , уровень нижнего бьефа

$Z_{нб}$  и напор на ГЭС – Н<sub>ГЭС</sub>, если регулирование будет произведено не на постоянный расход  $Q_{ГЭС}$ , а в соответствии с заданным графиком нагрузки ГЭС.

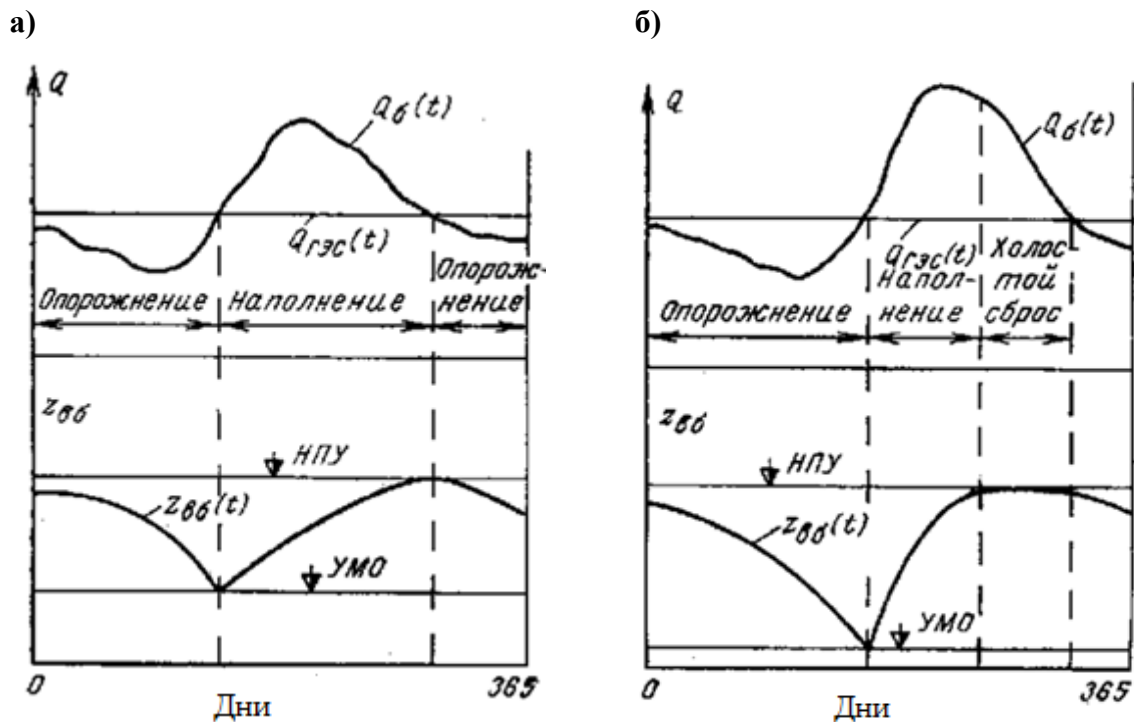


Рисунок 2 – Схемы годичного регулирования:

а – общая схема годичного регулирования; б – схема сезонного регулирования

В данной практической работе предлагается выполнить расчет годичного регулирования стока. Простейшим является расчет по календарным рядам наблюдаемого стока в прошедшем периоде. Пример расчета приведен в табл. 1.

Приток в водохранилище берётся на основе данных внутригодового распределения стока реки 95% обеспеченности, выраженного в млн. м<sup>3</sup>.

Принимается, что основным потребителем является ГЭС.

Годовой объем  $W_{ГЭС}$  принимаем на 20% меньше годового объема реки перед створом плотины (резервируем на будущие потери из водохранилища)

$$W_{ГЭС} = 0,8 W_p \text{ (м}^3\text{)}, \quad (2)$$

Внутригодовое распределение подачи воды на ГЭС назначаются с учетом уменьшения потребности энергии в летние и увеличением в зимние месяцы на 10%, т.е.:

$$Q_{IV-IX}=0,9 Q_{ГЭС} (\text{м}^3/\text{с}); \quad Q_{X-III}=1,1 Q_{ГЭС} (\text{м}^3/\text{с}). \quad (3)$$

Недостатки подсчитываются как разница между потреблением ГЭС и притоком.

Избытки подсчитываются как разница между притоком и потреблением ГЭС.

Полезный объем ( $W_{плз}$ ) принимается равным сумме недостатков минус меньший избыток. Мертвый объем ( $W_{мо}$ ) принимается равным 10% от полезного:  $W_{мо}=0,1 W_{плз}$ .

Полный объем  $W_{плн}=W_{мо}+W_{плз}$ .

Расчет объема водохранилища начинают с месяца начала наполнения водохранилища, который соответствует первому месяцу периода избытка, в рассматриваемом примере это апрель. Объем водохранилища в первом месяце наполнения водохранилища (апреле) равен сумме мертвого объема и избытка за апрель. В дальнейшие месяцы расчет объема водохранилища производится путем суммирования избытков и вычитания недостатков к объему предыдущего месяца последовательно от месяца к месяцу.

Причем, если объем водохранилища превышает  $W_{плн}$ , то необходимо производить сброс, который равен  $W_{сброс}=W_{вдхр}-W_{плн}$ .

Графики (рисунки 3 и 4) работы водохранилища  $W_{вдхр}=f(t)$ , притока в водохранилище  $W_{приток}=f(t)$ , и  $W_{потребление ГЭС}=f(t)$  строятся на основе расчетов, приведенных в табл. 1.

Таблица 1 – Определение изменения объемов водохранилища, млн.м<sup>3</sup>

Месяцы	$W_{приток}$	$W_{потребление ГЭС}$	Недостаток	Избыток	$W_{вдхр}$	$W_{сброс}$
I	2,24	6,16	3,92		6,876	
II	1,99	6,16	4,17		2,706	
III	3,91	5,04	1,13		1,856	
IV	9,99	5,04		4,95	6,806	
V	22,3	5,04		17,26	20,416	3,65
VI	13,14	5,04		8,1	20,416	8,1
VII	3,16	5,04	1,88		18,536	
VIII	7,2	5,04		2,16	20,416	0,28
IX	5,48	6,16	0,68		19,736	
X	3,98	6,16	2,18		17,556	
XI	2,99	6,16	3,17		14,386	
XII	2,57	6,16	3,59		10,796	
Итого	78,95	67,2	20,72	32,47	160,502	12,03

По графам 6 и 1 табл. 1 построен график работы водохранилища (рис. 3)э

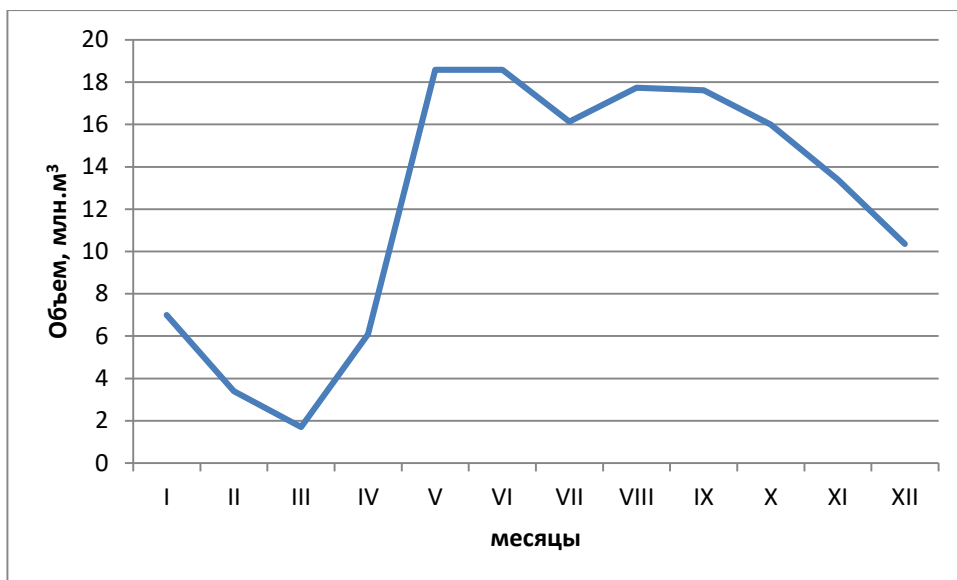


Рисунок 3 – График работы водохранилища

По графам 1 и 2 построен график притока в водохранилище, по графам 1 и 3 табл. 1 построен график потребления воды ГЭС (рис. 4).

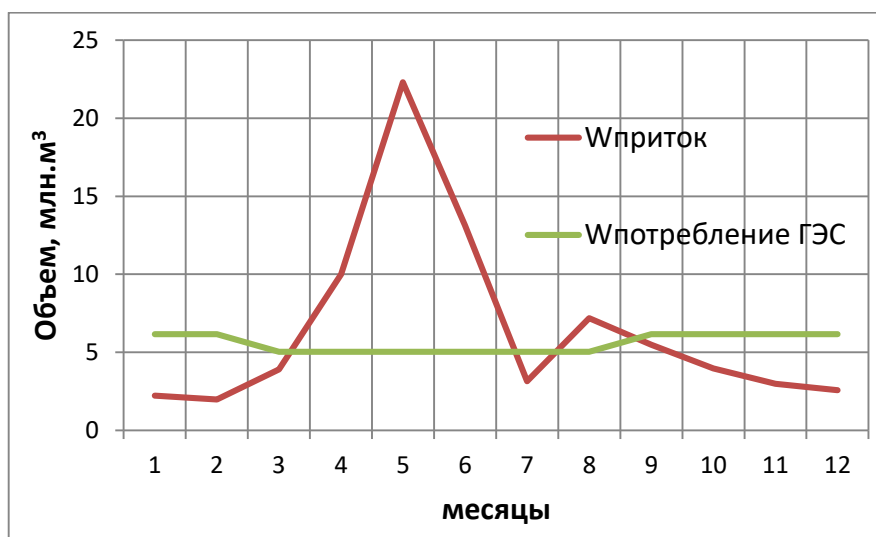


Рисунок 4 – График притока в водохранилище и потребления ГЭС

### Задание

1. Изучить по лекциям основные характеристики водохранилища.
2. Определить степень зарегулированности стока (коэффициент емкости  $\beta$ ).
3. Рассчитать объемы притока воды в водохранилище  $W_{\text{приток}}$  по ежемесячным расходам реки и объемы потребления ГЭС  $W_{\text{потребление ГЭС}}$ . Эти расчетные данные будут исходными для расчета работы водохранилища.

4. Составить таблицу по аналогии с табл. 2. Выполнить расчет недостатков и избытков воды в водохранилище и рассчитать объемы воды в различные периоды года.
5. Построить графики (по аналогии с рис 1 и 2):
  - работы водохранилища;
  - притока в водохранилище и потребления ГЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология. Учебник для вузов -2-е изд. испр.– М.: Высшая школа, 2007. – 463 с.
2. Каледа И.А., Денисова Н.А., Круглов Л.В. Гидрология и гидротехнические сооружения: учебное пособие. – Пенза: ПГУАС, 2014.
3. Фролова Г.П. Расчет основных гидрологических параметров малых рек северного Кыргызстана при отсутствии данных наблюдений: Методическое руководство к курсовой работе по дисциплине «Гидрология и гидрометрия» для студентов КРСУ направление «Строительство» профиль «Гидротехническое строительство». – Бишкек: КРСУ, 2015.
4. Орлов В.Г., Сикан А.В. Основы инженерной гидрологии. – С-Птб.: РГГМУ, 2003
5. Железняков Г.В., Неговская Т.А., Овчаров Е.Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока. – М.: Колос, 1994.
6. Михневич Э.И. Гидрология и регулирование стока: Методические указания к выполнению курсового проекта. – Минск: БНТУ, 2009.
7. Щавелев Д.С. Гидроэнергетические установки (гидроэлектростанции, насосные станции и гидроаккумулирующие электростанции). – Л., 1981.