

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный  
университет имени И. Т. Трубилина»

Факультет гидромелиорации

Кафедра строительства и эксплуатации  
водохозяйственных объектов

## **ГИДРОЛОГИЯ**

Методические рекомендации

по выполнению расчетных работ  
для бакалавров направления 20.03.02  
«Природообустройство и водопользование»

Краснодар  
КубГАУ  
2018

*Составители:* Е. Ф. Чебанова, И. А. Приходько

**Гидрология** : метод. рекомендации / сост. Е. Ф. Чебанова, И. А. Приходько. – Краснодар : КубГАУ, 2018. – 69 с.

В методических рекомендациях рассмотрены основные виды гидрологических расчетов для определения характеристик речного стока необходимые при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, мелиоративных и водохозяйственных систем.

Предназначены для студентов-бакалавров направления подготовки 20.03.02 «Природообустройство и водопользование».

Рассмотрено и одобрено методической комиссией факультета гидромелиорации Кубанского госагроуниверситета, протокол № 2 от 30.10.2017.

Председатель  
методической комиссии

С. А. Владимиров

- © Чебанова Е. Ф., Приходько И. А.,  
составление, 2018
- © ФГБОУ ВО «Кубанский  
государственный университет  
имени И. Т. Трубилина», 2018

## **ВВЕДЕНИЕ**

Гидрология – наука, изучающая закономерности распределения движения вод земного шара, количественные и качественные их изменения. Иначе - это наука о режиме вод земного шара. В ней выделяются подразделы – гидрология суши и океанология.

В методических рекомендациях рассмотрены основные виды гидрологических расчетов для определения характеристик речного стока необходимые при проектировании, строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений, мелиоративных и водохозяйственных систем.

Состав и объем гидрологических расчетов при определении расчетных характеристик стока зависят от наличия данных гидрометрических наблюдений за водным объектом – рекой. В зависимости от объема исходной информации различают методы расчетов характеристик стока при наличии, отсутствии и недостаточном объеме данных гидрологических наблюдений.

Методические указания ставят целью организовать самостоятельную работу студентов при выполнении ими расчетных работ по дисциплине «Гидрология». В них дано краткое описание последовательности расчетов по определению расходов воды реки в зависимости от состава исходной информации, приведен список рекомендуемой литературы и даны необходимые справочные данные.

Учебной программой курса «Гидрология» предусмотрено выполнение нескольких расчетно-графических работ и учебных заданий. Данные методические рекомендации подготовлены как

практическое пособие для самостоятельной работы студентов и предназначены для закрепления теоретических основ курса, приобретения студентами практических навыков обра-

ботки и анализа исходных гидрометрических материалов, выполнения гидрологических и водохозяйственных расчетов.

## 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### *1.1 Предмет и метод гидрологии*

Слово *гидрология* состоит из двух греческих слов: *hudor*, что значит вода, и *logos*, что значит учение. Следовательно, в самом широком смысле термин гидрология означает учение о воде. В настоящее время под *гидрологией* подразумевают науку, изучающую гидросферу, ее свойства и протекающие в ней процессы и явления во взаимосвязи с атмосферой, литосферой и биосферой.

***Гидрология*** – наука о водах земного шара их режиме и деятельности. Различают гидрология морей океанов – *океанология* и *гидрологию суши*.

Огромную часть природных вод составляют воды океанов и морей, которые изучаются разделом гидрологии — *океанологией*. Меньшая часть воды находится на *водных объектах суши*. *Водные объекты суши* образуются в результате выпадения атмосферных осадков, значительная часть которых формируется при испарении воды океанов и морей.

Воды, находящиеся на поверхности суши в виде различных водных объектов, *называются поверхностными водами*, а раздел гидрологии, изучающий их, — *гидрологией суши*. Воды, находящиеся под земной поверхностью или образующиеся в атмосфере, изучаются соответственно *гидрогеологией* и *метеорологией*.

Таким образом, в *гидрологию суши* включается прежде всего учение о поверхностных водах, т. е. о реках, ручьях, суходолах с теми разделами из гидрогеологии, метеорологии и других смежных дисциплин, которые необходимы для по-

нимания и раскрытия сущности процессов поверхностного стока и вопросов баланса влаги на поверхности суши.

Общие вопросы изучения – осадки, влажность воздуха, испарение, температура, состояние поверхности - растительность.

*Гидрологию суши* можно разделить по изучаемым водным объектам на *гидрологию рек* (речная гидрология), озер (*лимнология*), болот (*тельматология*), ледников (*гляциология*). Совокупность тех областей гидрологии суши, которые непосредственно связаны с практическим применением гидрологии при решении инженерных водохозяйственных задач, называют *инженерной гидрологией*.

*Инженерная гидрология* - раздел гидрологии, разрабатывающий методы гидрологических расчетов и прогнозов.

*Инженерная гидрология* дает возможность решать ряд практических задач по гидротехнике, орошению, водоснабжению, водному транспорту, лесосплаву и для возведения на водотоке различных гидротехнических сооружений, таких как мосты, трубы, перепады, быстротоки и другие искусственные сооружения.

Одной из задач *инженерной гидрологии* является достоверное определение или прогноз максимальных расходов дождевых или снеговых вод, объема стока и наносов, которые предопределяют не только размеры различных гидротехнических сооружений реках, но и обеспечивают надежность их работы.

Основным понятием в гидрологии суши считается *водный объект*. *Водные объекты* подразделяются на *водотоки* и *водоемы*. Водный объект, в котором вода движется в направлении уклона в углублении земной поверхности, называется *водотоком*. Различают *постоянные водотоки* (движение воды происходит в течение всего года или большей его части) и *временные* (движение воды происходит меньшую часть года). Водный объект в углублении суши, характеризующий-

ся замедленным движением воды или полным его отсутствием, называется *водоемом*. Типичные формы водоемов — озера и водохранилища.

Современная гидрология располагает большим арсеналом взаимодополняющих друг друга методов изучения гидрологических процессов. Среди них важное место занимают методы полевых исследований, которые подразделяются на стационарные и экспедиционные.

Большинство результатов стационарных наблюдений на сети гидрологических станций и постов публикуется в материалах Государственного водного кадастра (ГВК), который представляет собой систематизированный, постоянно пополняемый и уточняемый свод сведений о водных объектах, режиме, качестве, использовании вод и составляет единый Государственный водный фонд страны.

В гидрологии широко используются экспериментальные исследования (в природных условиях или в лаборатории). При анализе материалов гидрологических наблюдений используются эмпирические и статистические методы. Теоретические методы анализа гидрологических процессов включают приемы географического обобщения, картографирования, методы математического и имитационного моделирования, системный анализ др.

## **1.2        *Виды земных вод***

Все воды делятся на поверхностные, подземные и атмосферные.

***Поверхностные воды*** заполняют впадины на поверхности земли, образуя океаны. Моря, озера, они встречаются в пределах суши в виде рек. Озер, болот, прудов, водохранилищ. Снежников. Ледников.

***Подземные воды*** – воды, находящиеся в толщах горных пород верхней части земной коры в жидком, твёрдом и паро-

образном состоянии. Слои горных пород, насыщенные гравитационной водой, образуют *водоносные горизонты*. Первый от поверхности Земли постоянно существующий безнапорный водоносный горизонт называется горизонтом грунтовых вод. Всё пространство от поверхности Земли до зеркала грунтовых вод называется *зоной аэрации*, в которой происходит просачивание вод с поверхности. В зоне аэрации на отдельных разоб-щённых прослоях пород, обладающих меньшей фильтрационной способностью, в период питания грунтовых вод образуются временные скопления подземных вод – *верховодка*.

**Атмосферные воды** - водяные пары в атмосфере, конденсация их приводит к выпадению осадков (дождь, снег, крупа, град), выделению росы инея, измороси.

Воды, находящиеся в пределах материков и островов называют *водами суши или внутренними водами*.

### **1.3      *Круговорот воды в природе***

Примерно три четверти поверхности земного шара покрыто водной оболочкой — Мировым океаном. С поверхности морей и океанов благодаря солнечной радиации испаряется огромное количество воды (505 тыс. км<sup>3</sup> в год). Поднимаясь в верхние слои атмосферы, испарившаяся влага конденсируется и в виде дождя, снега или града выпадает на поверхность

Земли, а другая часть таким же образом выпадает снова в Мировой океан. Однако на сушу переходит относительно небольшое количество влаги — около 8 % от всего испарения на океанах и морях. Это количество воды и является активным в общем круговороте воды. Вода в жидком или твердом состоянии, выпадающая из облаков или осаждающаяся из воздуха на поверхность Земли и на предметы, называется *осадками*.

*Осадки*, выпавшие на поверхность Земли, частично образуют водотоки, которые стекают с возвышенных мест в низ-

кие и впадают в реки, а реки — в океаны и моря. Эти осадки и образуют поверхностный сток. Однако на долю поверхностного стока приходится менее 40 % всех осадков, выпавших на поверхность.

Численной характеристикой поверхностного стока является коэффициент стока  $\phi$  — отношение объема стока к объему осадков.

Несоответствие объемов осадков и стока объясняется тем, что часть осадков вновь испаряется и уходит в атмосферу, другая часть, просачиваясь сквозь толщу грунтов, образует подземный сток, который, в свою очередь, по водонепроницаемому слою снова возвращается в океан. Описанный процесс называется круговоротом воды в природе (рис.1.1) и выражается уравнением водного баланса.

**Круговорот воды** – различают большой и малый круговорот воды.

Малый – вода испаряется над морем (океаном) и возвращается обратно в него в виде осадков.

Большой – вода испаряется с моря (океана), часть испарившейся воды переносится на сушу, выпадает в виде осадков. И распределяется по трем основным направлениям: часть стекает по поверхности земли в реки, моря океаны; часть просачивается в грунт и затем также попадает в реки подземным путем; часть испаряется в атмосферу. Через реки сточные озера вода вновь попадает в океан, завершая сложный процесс большого круговорота.

Водный баланс в районе моря может быть выражен уравнением:

$$Z_M = X_M + Y, \quad (1.1)$$

На суше уравнение водного баланса будет иметь вид:

$$Z_C = X_C - Y. \quad (1.2)$$



Складывая уравнения (1.1) и (1.2), получим общее уравнение водного баланса для всего земного шара:

$$Z_M + Z_C = X_{и} + X_c. \quad (1.3)$$

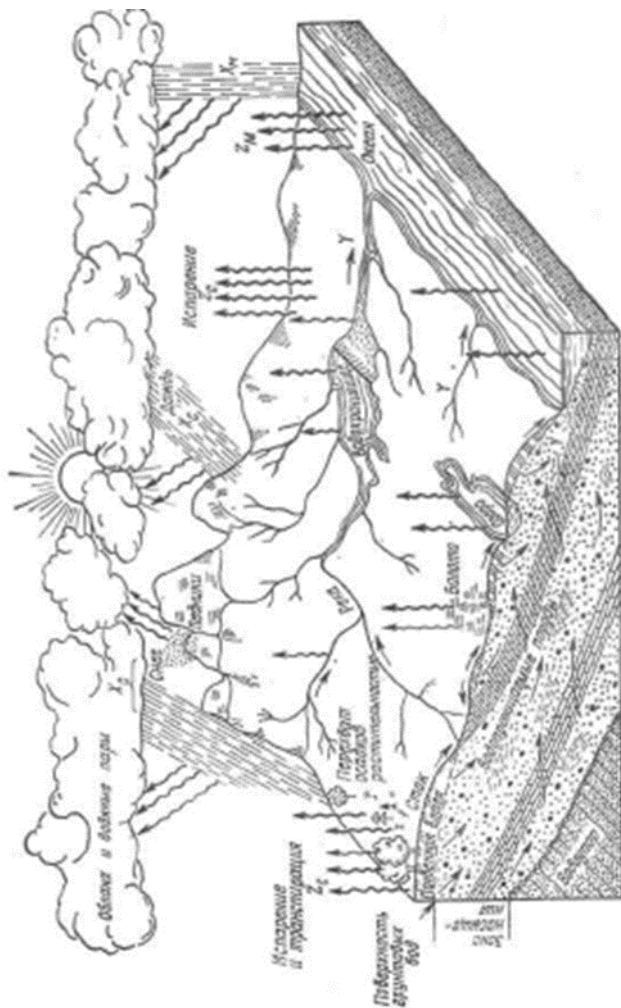


Рисунок 1.1 – Круговорот воды  
 $Z_M$ ,  $Z_0$  – испарение с поверхности океана, суши;  $X_M$ ,  $X_0$  – осадки  
 на поверхность океана и суши

В этих формулах  $Z_M$  — количество воды, испаряющейся за год с поверхности океанов и морей;  $X_M$  — количество осадков, выпадающих за год на поверхность океанов и морей;  $X_c$  — количество осадков, выпадающих за год на поверхность суши;  $Z_c$  — количество воды, испаряющейся за год с поверхности суши;  $Y$  — сток речных вод в океаны и моря за год.

От интенсивности такого процесса, характеризуемого количеством циклов «испарение – осадки», которые успевает совершить влага за единицу времени, зависит влажность климата данного района.

Территории, с которых вода стекает в реки, впадающие в океан, называются *сточными областями*. Если же с данной территории стекает река и впадает в бессточное озеро, то такие области называют *бессточными*. Эти области земного шара незначительны по своим размерам, поэтому объем осадков в этих зонах составляет лишь малую часть влагооборота в природе.

## 2 ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКИ И ЕЕ БАССЕЙНА

### 2.1. Реки и их типы

*Река* – природный водный поток (водоток) сравнительно больших размеров, как правило, постоянный, питающийся за счёт поверхностного и подземного со своего водосбора и движущийся в разработанном им четко выраженном русле.

В формировании стока рек принимают участие не только атмосферные осадки, выпадающие на поверхность водосборных бассейнов, но и воды, сформировавшиеся ранее и заключенные в озерах, болотах, ледниках, и подземные воды. На различных континентах и в различные сезоны года соотношение разных видов питания рек неодинаково.

*В целом на большей части континентов преобладает дождевое питание рек, основная доля дождей приходится на лето, осень, зиму. Снеговое питание имеет место весной и летом. Подземное питание преобладает только в горных районах Тибета и Южной Америки.*

В северном полушарии с севера на юг почти исключительно снеговое питание постепенно уменьшается, возрастает доля стока, сформированного дождями. Дождевое питание преобладает в формировании стока рек районов, прилегающих к океанам. В Индии, Юго-Восточной Азии, Центральной Африке сток формируется исключительно дождевыми водами. В горных районах преобладает ледниковое питание.

В южном полушарии большинство рек питается преимущественно дождевыми водами (а на юге Южной Америки достаточно значимо снеговое питание). В пустынях обоих полушарий стока нет, так как нет ни осадков, ни речной сети.

Тип источника питания, а также тип почвы и горных пород, через которые проходит вода на своем пути к водотoku или водоему, определяет ее химический состав: обычно в грунтовой воде содержание растворенных веществ больше, чем в водах поверхностного стока.

Существует несколько классификаций рек: по площади водосбора, по длине реки, по характеру рельефа водосбора, в зависимости от ландшафтных зон.

*1. По площади водосбора выделяют следующие типы рек:*

1. Большая река – река, бассейн которой располагается в нескольких физико-географических зонах и гидрологический режим которой не свойственен режиму рек каждой зоны в отдельности ( $F \geq 50\ 000\ \text{км}^2$ ).

2. Средняя река – река, бассейн которой расположен в одной физико-географической зоне и гидрологический режим которой соответствует режиму рек этой зоны ( $F = 2\ 000 - 50\ 000\ \text{км}^2$ ).

3. Малая река – река, бассейн которой расположен в одной физико-географической зоне, но ее гидрологический режим отличается от зонального режима рек этой зоны под влиянием местных аazonальных факторов ( $F= 1 - 2\ 000\ \text{км}^2$ ). Сток малой реки может прерываться на короткие промежутки времени.

*II Характеру рельефа водосбора* реки делятся на:

1. Равнинные реки – текут по низменностям и равнинам с высотами до 300-500 м над уровнем моря и малыми уклонами  $\leq 5-6\ \text{‰}$  (промилле).

2. Полугорные реки – в местностях с высотами 500-800 м и уклонами  $\leq 15 - 20\ \text{‰}$ .

3. Горные реки – на хребтах, нагорьях с высотами  $> 800\ \text{м}$  и уклонами  $\geq 20\ \text{‰}$ .

На многих реках перемежаются участки горного и равнинного характера. Горные реки, как правило, отличаются большими уклонами, бурным течением, текут в узких долинах; преобладают процессы размыва. Для равнинных рек характерно наличие извилин русла, или меандр, образующихся в результате русловых процессов.

Критерием для разделения (как и для любых горных потоков) служит число Фруда  $Fr$ :

$$Fr = \frac{V^2}{gh} \quad (2.1)$$

где  $h$  – глубина потока (м);

$V$  – скорость течения (м/с);

$g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>).

К равнинным рекам относятся реки с числом Фруда менее 0,1; от 0,1 до 1 – к полугорным; к горным – более 1.

*III В зависимости от ландшафтных зон* реки зон:

1. Арктической

2. Тундровой

3. Лесной
4. Степной
5. Полупустынной
6. Пустынной

*IV По отношению к водному режиму, согласно классификации Б. Д. Зайкова, выделяют три основные группы:*

- 1) реки с весенним половодьем;
- 2) реки с половодьем в теплую часть года;
- 3) реки с паводочным режимом.

Для рек первых двух групп характерны ежегодно повторяющиеся примерно в одни и те же сроки большие подъемы воды и сравнительно низкая водность в остальное время года. Паводки большей частью редки и носят случайный характер.

*V В зависимости от типа питания выделяют:*

1 (Ss) – почти исключительно снеговое питание (снеговое питание составляет более 80%).

2 (Sx) – преимущественно снеговое питание (> 50%).

3 (Rr) – почти исключительно дождевое питание (дождевое питание составляет более 80%),

4 (Rx) – преимущественно дождевое питание (> 50%),

5 (Gx) – преимущественно ледниковое питание,

6 (sx) – смешанное питание (преобладает снеговое),

7 (rx) – смешанное питание (преобладает дождевое).

8 (gx) – смешанное питание (преобладает ледниковое),

9 (ux) – смешанное питание (преобладает грунтовое).

Буква «x» условных обозначениях заменяет тот или иной второстепенный вид питания.

Для краткости виды питания обозначают следующими символами: снеговое – Ss, дождевое – Rr, грунтовое – Uu и ледниковое – Gg, причем большими буквами пользуются в тех случаях, если доля того или иного вида питания превышает 50%, а малыми, когда она менее 50% годового стока. Если тот или иной источник является явно преобладающим и его доля

составляет более 80% годового стока, то реки можно отнести к типу с исключительно снеговым (дождевым, ледниковым или грунтовым) питанием; реки, в питании которых это преобладание менее резко выражено и доля одного из источников

составляет от 50 до 80% годового стока, можно причислить к водотокам преимущественно снегового (дождевого, грунтового или ледникового) питания; наконец, реки, в питании которых нет резкого преобладания какого-либо из источников питания и доля каждого из них не превышает 50% общего годового стока, можно считать водотоками со смешанным питанием.

В зависимости от той роли, которую играет тот или иной источник питания в формировании режима рек, можно выделить четыре основные группы рек. Реки с преобладанием:

- 1) снегового;
- 2) дождевого;
- 3) ледникового;
- 4) грунтового питания.

*VI По характеру ледового режима* реки можно разделить на следующие основные группы:

1) реки с ежегодным устойчивым ледоставом различной длительности. К этой группе принадлежит подавляющее большинство рек;

2) реки с неустойчивым ледоставом, наблюдающимся ежегодно. Сюда принадлежат реки крайних западных и южных районов Европейской части России и Северного Кавказа – Неман, Висла, Днестр, Кубань и др., а также многие водотоки юга Приморья на Дальнем Востоке;

3) реки, на которых наблюдаются ледовые явления (шуга, забереги и т. д.), но ледостав отсутствует. К этой группе принадлежит большинство рек Кавказа и горных областей Средней Азии и Алтая; реки эти в литературе носят название шугоносных;

4) реки, на которых ледовые образования вообще отсутствуют в силу теплого климата. К ним относятся водотоки сравнительно небольших районов – Колхидской и Ленкоранской низменностей на Кавказе, ряд рек на юге Туркмении и в Средней Азии.

5) реки промерзающие и перемерзающие. К промерзающим относятся реки в которых на большой длине промерзает вся толща воды до дна, а перемерзающие реки – это образование ледяных перемычек лишь на отдельных мелководных участках русла (например, на перекатах)

*VII реки пересыхающие в засушливые периоды*, когда из-за отсутствия дождей поверхностное питание прекращается, а подземное (грунтовое) истощается. Временно пересыхают лишь малые реки.

*VIII По русловым процессам (устойчивости русла):* устойчивые и неустойчивые.

Тип русловых процессов – квазициклическая схема деформаций речных русел (на конкретном участке реки).

Существуют различные типы русловых процессов. Среди них основные: меандрирование, русловая многорукавность, пойменная многорукавность (разветвленное русло) и др. Также существуют различные промежуточные и крайние проявления русловых процессов. Для многих типов русловых процессов выявлены закономерные схемы развития речных русел.

## ***2.2 Водосбор и бассейн реки***

Каждая река имеет свою область питания – *водосбор (водосборный бассейн)*. *Водосбором* или *речным бассейном* называется территория, с которой в речную систему (или в данную реку до определенного выделенного в ней створа) стекает вода при выпадении атмосферных осадков. Водосборы двух соседних речных систем отделяются друг от

друга *линией водораздела*, которая проходит по наивысшим отметкам земной поверхности и ограничивающими территорию, с которой водный объект получает питание ( рис.2.1).

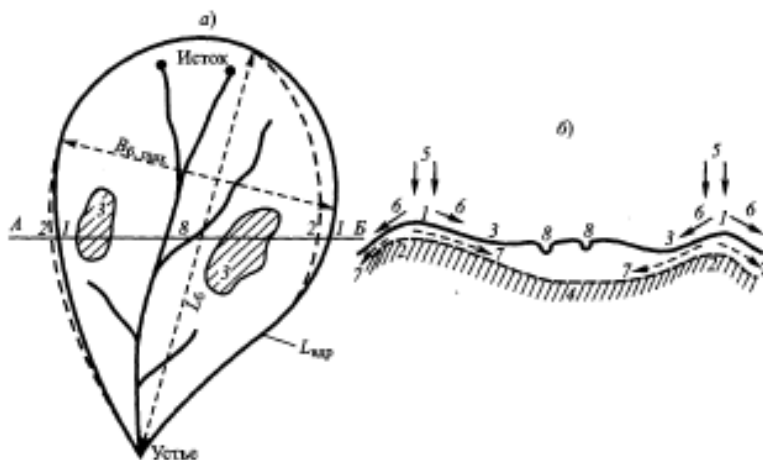


Рисунок 2.1 – Схема бассейна и водосбора реки в плане (а) и в поперечном разрезе (б)

1 – граница бассейна и поверхности водосбора реки (орографический водораздел); 2 – граница подземного водосбора (подземный водосбор); 3 – бессточные области, не входящие в водосбор реки; 4 – водоупор; 5 – осадки; 6 – поверхностный сток; 7 – подземный сток; 8 – русла рек

*Водораздел* - линия на земной поверхности разделяющая сток атмосферных осадков по двум направлениям. Линия разделяющая сток по разным речным системам – *водораздел речного бассейна*.

Следует различать водосбор и бассейн реки. *Водосбор реки* – это часть земной поверхности и толща почво-грунтов и горных пород, откуда вода поступает к водному объекту.

Бассейн любого водного объекта состоит из:



- *поверхностного водосбора* – участка земной поверхности, с которой вода поступает в водный объект путем свободного стекания по поверхности

- *подземного водосбора* – толщи почво-грунтов с которой вода поступает в водный объект путем фильтрации.

Причем поверхностный водосбор может не совпадать с подземным. Вода поступает в реку как с поверхности земли, так и из ее глубин. Площадь, с которой вода поступает в реку, называется *водосборной площадью*.

*Речной бассейн* включает часть поверхности земли и всю толщу почвогрунтов из которого вода поступает в реку.

Иногда *водосборная площадь* меньше *площади бассейна*. Это тогда, когда на площади есть места, где поверхностный сток отсутствует, либо есть площади внутреннего стока. Однако ввиду незначительного объема подземного стока в реку по сравнению с поверхностным, оба понятия объединили.

К основным характеристикам бассейна относятся площадь, форма, высота и уклон водосбора, длина и средняя ширина водосбора.

Величина площади водосбора не только определяет водность реки, но и оказывает непосредственное влияние на процессы формирования стока. Площадь бассейна определяется по картам с горизонталями масштаба 1:25 000, 1:50 000 и 1:100 000.

Определение площадей любых контуров, изображенных на топографических картах (площадей водосборов и межприоточных пространств, лесов, озер, болот), производится различными способами: графическим, планиметрированием, способом взвешивания и фотоэлектрическим.

Графический способ рекомендуется применять при определении малых площадей размером 1-2 дм<sup>2</sup> и в тех случаях, когда для определения площадей приходится пользоваться картами, бывшими в употреблении, и способ планиметрирования дает большие ошибки. При использовании этого

метода заготавливается специальная палетка из органического стекла, целлулоида или кальки. На палетку наносится сетка с ячейками со стороной по 2 мм. В зависимости от масштаба карты, по которой определяется площадь контура, находится цена деления каждой ячейки в км<sup>2</sup>. Палетка наносится на контур и отсчитывается число полных ячеек и части неполных (на глаз). Отсчет числа ячеек в контуре рекомендуется производить дважды; если расхождение между общим числом ячеек не превышает 2%, то окончательный результат принимается как среднее значение из двух отсчетов. Общее число ячеек в контуре, умноженное на цену деления, дает площадь контура.

Площадь водосбора каждой реки нарастает по мере продвижения вниз по течению и по мере впадения в нее притоков. Для наглядного представления об изменении площади бассейна от истока к устью строят график нарастания площади водосбора. По горизонтали откладывают длину главной реки, а по вертикали – площади водосбора главной реки между притоками и площади бассейнов притоков (рис.2.2)

Для составления графика нарастания площади водосбора по длине реки необходимо знать расстояния от устья (в километрах) до впадения правого и левого притоков и площади водосбора до этих пунктов.

Для построения графика нарастания площади водосбора реки назначаются масштабы: вертикальный и горизонтальный.

По горизонтали откладывают расстояния от устья к истоку реки, для этого прочерчивают горизонтальную линию, соответствующую длине главной реки от истока к устью. За начало отсчета принимается устье реки. Затем отмечают точки впадения притоков по порядку от истока к устью.

В метях впадения притоков, последовательно проводят вертикальные линии, соответствующие площадям водосборов притоков. На графике наклонными линиями изображается нарастание площадей межприточных пространств, а верти-

кальными линиями - площадью водосборов притоков. Построение на графике ведется для правого берега вниз от линии длины реки, для левого берега - вверх от нее.

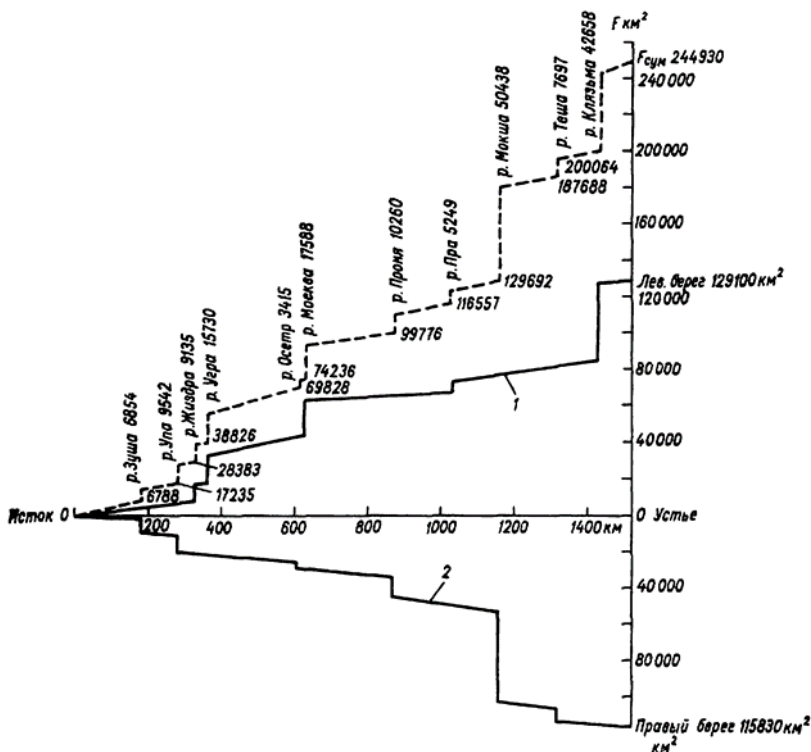


Рисунок 2.2 – Графики нарастания площади бассейна реки Оби

Суммарный график нарастания площади водосбора строится на этом же графике вверх от линии длины реки.

Ступени на графике отражают места впадения притоков и резкое увеличение площади.

По графику нарастания площади водосбора можно в любом пункте реки определять суммарную площадь водосборов по каждому берегу.

Длиной водосбора  $L_{\delta}$  называется расстояние по прямой от истока до устья реки. Длину водосбора определяют циркулем до водораздельной линии.

Средняя ширина  $B$  водосбора вычисляется по формуле:

$$B = \frac{F}{L_{\delta}}, \quad (2.2)$$

где  $F$  - площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $L_{\delta}$  - длина бассейна, км.

По картам определяют еще максимальную ширину водосбора  $B_{\text{макс}}$ .

Форма речного бассейна оказывает влияние на степень одновременного поступления воды к замыкающему створу (устью).

Форма речного водосбора характеризуется коэффициентом асимметрии и коэффициентом развития водораздельной линии. Коэффициент асимметрии выражает степень асимметрии бассейна и определяется по формуле:

$$a = \frac{F_l - F_n}{F_l + F_n}, \quad (2.3)$$

где  $F_l$  и  $F_n$  - площади водосборов левого и правого берегов реки.

Коэффициент вытянутости водосбора  $\delta$  определяется по формуле:

$$\delta = \frac{L^2}{F} \quad (2.4)$$

где  $L$  - длина реки, км;  $F$  - площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Коэффициент развития водораздельной линии  $m$  представляет собой отношение длины водораздельной линии  $S$  к

длине окружности круга  $s$ . Площадь которого равна площади водосбора  $F$ , и определяется по формуле:

$$m = \frac{S}{2\sqrt{\pi \cdot F}} = 0,282 \frac{S}{\sqrt{F}}, \quad (2.5)$$

где  $S$  – длина водораздельной линии, км;

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

Речные бассейны в большинстве случаев имеют грушевидную форму и характеризуются сужением в верховьях и низовьях и расширением в средней части.

Наименьшее возможное значение коэффициента  $m$  равно единице, с его увеличением форма речного бассейна больше отличается от формы круга. При  $m = 1$ , длина пути стока до замыкающего створа будет минимальной, а уровни и расходы воды в реке будут нарастать быстрее.

Между длиной реки  $L$  (км) и площадью бассейна  $F$  (км<sup>2</sup>) существует определенная связь, близкая к квадратичной:

$$L = \sqrt{F}. \quad (2.6)$$

Например для большинства равнины рек европейской части России существует следующая эмпирическая зависимость:

$$L = 1,36F^{0.56}. \quad (2.7)$$

Важными характеристиками территории являются лесистость, заболоченность и озёрность. Эти факторы характеризуются коэффициентами: лесистости  $K_{лес}$ , заболоченности  $K_{бол}$ , озёрности  $K_{оз}$  (%):

$$K_{лес} = \frac{\Sigma f_{лес}}{F} \cdot 100, \quad (2.8)$$

$$K_{бол} = \frac{\sum f_{бол}}{F} \cdot 100, \quad (2.9)$$

$$K_{оз} = \frac{\sum f_{оз}}{F} \cdot 100, \quad (2.10)$$

где  $\sum f_{лес}$ ,  $\sum f_{бол}$ ,  $\sum f_{оз}$  – сумма площадей лесов, болот, озер в бассейне площадью  $F$  км<sup>2</sup>.

### 2.3 Речная и гидрографическая сеть

**Рекой** называется естественный открытый поток воды, который стекает по рельефу с повышенных точек земной поверхности в пониженные.

Каждая река стремится достигнуть наинизшей точки и вливается или в океан, или в море, или в озеро, соединенной с ней или в другую реку (базис эрозии). Река - это естественный водный поток протекающий в русле и питающийся за счет поверхностного и грунтового стока.

Существуют реки, которые не доносят своих вод до моря и имеют глухой или слепой конец (причина – сильное испарение, просачивание, разбор воды, просачивание через трещины – подземная река).

Образование рек - воды, стекающие по поверхности земли, грунтовые воды, выступающие на поверхность, сначала собираются в струйки, потом сливаются образуя ручьи, которые соединяются между собой образуя малые, а затем средние и большие реки.

Причины образования рек разнообразны: родники, тающие льды, вечные снега, озера и т.п.

Атмосферные осадки и источники грунтовых вод не сразу создают большие реки. Вода сначала собирается в отдельные струйки, затем в ручьи, которые, постепенно соединяясь, образуют реки.

Водность реки определяют два фактора: площадь бассейна и географическое

Вода, поступающая на поверхность земли в виде осадков или выходящих подземных потоков, собирается в понижениях рельефа и, стекая в направлении уклона (понижения местности) под действием силы тяжести образует поверхностные водотоки. Водотоки в зависимости от их величины и физико-географических условий, в которых они протекают, могут быть постоянными или периодически действующими: *постоянные и временные*. В постоянных водотоках движение воды наблюдается в течение всего года или его большей части, а во временных вода движется меньшую часть года.

Система постоянно и временно действующих водотоков образует русловую сеть. Постоянные водотоки образуют речную сеть. Русловая сеть территории вместе с расположенными на ней озерами образует гидрографическую сеть.

#### Временные потоки + постоянные потоки

*Русловая сеть*

#### Временные потоки + постоянные потоки + озера

*Гидрографическая сеть*

Совокупность всех рек, сбрасывающих свои воды через главную реку называется *речной системой* или *речной сетью*.

Совокупность всех рек данной территории составляет *гидрографическую сеть*.

Река, которая выносит свои воды в океан (море, бессточное озеро) называется *главной рекой*.

Совокупность всех рек вливающих свои воды в одну главную реку, составляет *речную систему*.

*Речная система* состоит из главной реки и ряда притоков (рис.2.3). Река, впадающая непосредственно в море или бессточное озеро, называется главной. Иногда название главной реки присваивается более или менее значительной реке впадающей в другую. Реки, впадающие в главную реку, назы-

ваются притоками первого порядка. Далее следуют притоки второго порядка, третьего и т.д. *Совокупность всех рек, впадающих в главную реку, называется речной системой или речной сетью.* Иногда название главной реки присваивается более или менее значительной реке впадающей в другую.

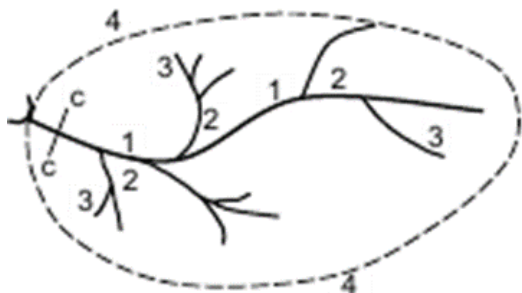


Рисунок 2.3 – Речная система

1– главная река, 2– приток 1 порядка, 3– приток 2 порядка; 4 – водораздел, С–С – разрез речной долины

Все водотоки (постоянные и временные), а также водоемы в виде озер и болот в пределах какой-либо территории составляют гидрографическую сеть этой территории. Таким образом, речная сеть является частью гидрографической сети.

Начало реки называется *истоком*. Конечный участок реки, где речные воды вливаются в море или бессточное озеро, называется *устьем*. Реки, теряющиеся в песках или трещиноватых известняках (карстовые реки), не имеют устья.

Некоторые реки (Волга, Урал, Днепр и др.) при впадении в море делятся на множество рукавов. Система рукавов образует *дельту*.

Отметка уровня моря или бессточного озера в месте впадения реки называется *базисом эрозии*. Для притока базисом эрозии является отметка уровня реки в месте впадения притока.



В пределах речной системы выделяют характерные участки с разными условиями формирования стока (рис.2.4)

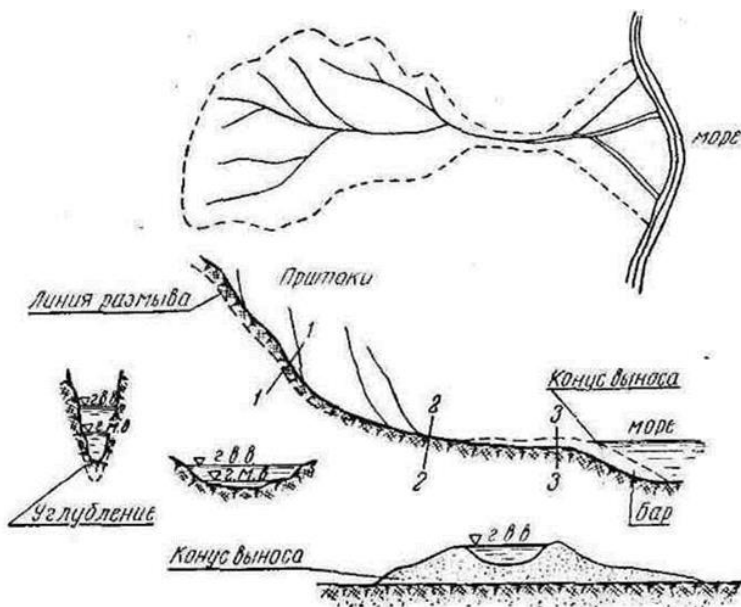


Рисунок 2.4 – План, продольный и поперечный профили реки

1–1– горный и высокогорный участки; 2–2 – среднее течение; 3–3 – нижнее течение и дельта

*Исток* реки – начало ее течения или слияние двух рек.

*Верховье* реки следует за истоком (большие скорости, малый расход, большая размываемость)

*Среднее течение* – более спокойное течение, полноводная река, еще происходит врез, но замедленный.

*Низовье* – нижняя часть, малые скорости, накопление и отложение наносов.

Место впадения реки – *устье*. Расстояние от истока до устья – *длина реки*.

Устья могут быть:

- дельта- многорукавное русло;
- лиман – ограниченное от моря пространство, которое река сама создала своими наносами;
- губа- удлинённые морские заливы, служащие продолжением впадающих рек (Печерская губа, Обская губа и т.п.)
- эстуарий – переуглублённое устье отделённое от моря морской грядой.

Реки – водотоки, текущие в углублениях земной поверхности. За многие годы своего существования каждая река сформировала свою своеобразную *речную долину*. *Речная долина* – это линейно вытянутая форма рельефа, образованная деятельностью рек, и для них характерна извилистая в плане форма и общий наклон ложа к устью (тангенс угла наклона называется уклоном). Встречаясь, речные долины никогда не пересекаются, а объединяются, образуя речные системы. *Речные долины* ограничены коренными берегами, часто крутыми. Иногда берега долин имеют уступчатую форму и спускаются к реке террасами. Террас может быть несколько – 1, 2 и т.д. Затопляемая во время половодья нижняя терраса называется поймой. Вышележащие незатопляемые террасы называются первой, второй и т. д. надпойменными террасами.

В поперечном сечении в речной долине (рис.2.5) выделяют следующие части:

1 – дно, наиболее низкая ее часть; та часть дна, которая занята речным потоком - русло реки.

*Русло реки* – там, где течет река постоянно, ограничивается бровкой берега – соответствует моменту излива воды на пойму во время половодья (паводка).

Часть дна долины, которая затапливается в периоды высокой водности, носит название *поймы*.

2 – склоны, высокие участки суши, ограничивающие с боков дно долины;

3– террасы, площадки, поверхность которых, близка к горизонтальной, расположенные в пределах склонов долины.

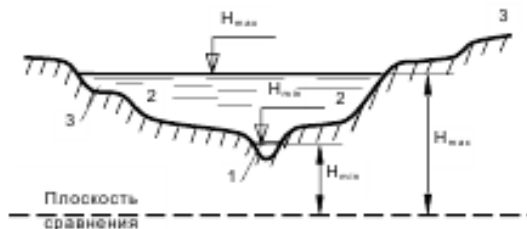


Рисунок 2.5 – Разрез речной долины С-С

В поперечном сечении поймы выделяют приустьевую (более повышенную), центральную (несколько более низкую и ровную) и притеррасную (наиболее пониженную) части. Формирование поймы связано с внутригодовыми изменениями водности реки — с прохождением половодья и паводков, несущих большое количество наносов. Пойма регулирует водный режим. Размеры поймы определяют уровни воды в реке и расходы.

Глубины речных долин колеблются в широких пределах: на равнинах они составляют 200-300 м, в горной местности – на порядок больше.

В образовании речных долин главную роль играет речная вода. Река, разрабатывая профиль своей долины, постепенно врезается в ее дно и создает террасообразное поперечное сечение долины.

#### ***2.4 Морфометрические характеристики реки***

К морфометрическим характеристикам реки относятся:

– длина реки  $L$  – расстояние вдоль русла между истоком и устьем, км;

- протяженность речной сети  $\sum l_i$  – общая сумма всех рек в пределах бассейна, км;
- густота речной сети;
- извилистость русла;
- разветвленность речной сети;
- падение реки;
- уклон реки.

Для наглядного изображения главной реки и ее притоков строится гидрографическая схема реки (рис.2.6)

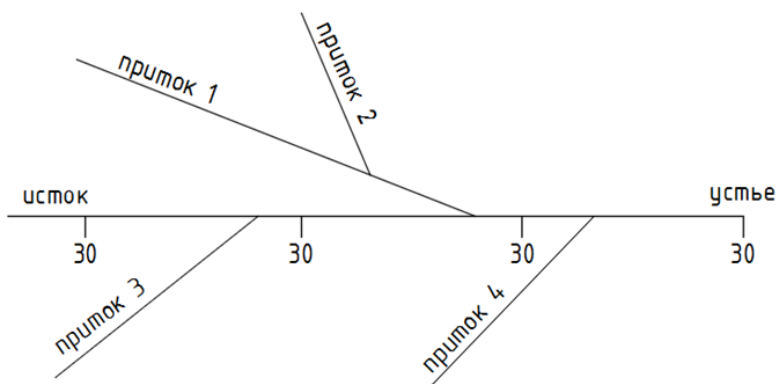


Рисунок 2.6 – Гидрографическая схема реки

*Густота речной сети* характеризуется коэффициентом густоты речной сети  $K_{гус}$  как отношение суммарной протяженности речной сети к площади бассейна ( $\text{км}/\text{км}^2$ ) и определяется по формуле:

$$K_{гус} = \frac{\sum l_i}{F} \quad (2.11)$$

Этот коэффициент зависит от рельефа, геологии, почв, климата, осадков, стока.

*Извилистость рек* характеризуется коэффициентом извилистости, как отношение фактической длины  $L$ , определенной с учетом всех извилин, к длине прямой линии  $l$ , соединяющей

начальный и конечный пункты участка реки для которого определяются извилистость (рис.2.7, а)

$$K_{изв} = \frac{L}{l} \quad (2.12)$$

Для сравнения коэффициент извилистости составляет: Волга – 0,24; Европейские реки РФ – 0,1-0,2; Мзымта – 0,97.

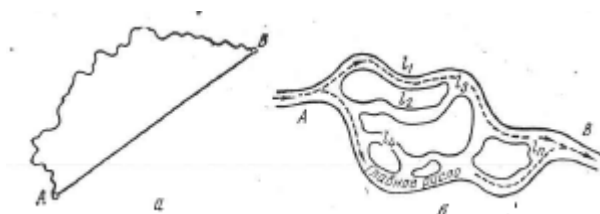


Рисунок 2.7 – Извилистость (а) и разветвленность рек (б)

В пределах широких пойм речные русла могут разветвляться (рис 2.7, б). В этом случае определяется *коэффициент разветвленности*, как отношение суммы длин всех протоков, в том числе и участка главного русла, к длине участка главного русла.

$$K_{разв} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n + L}{L} \quad (2.13)$$

Между длиной реки L (км) и площадью бассейна F (км<sup>2</sup>) имеет связь, близкая к квадратичной:  $L \approx \sqrt{F}$ . Для равнинных рек европейской территории РФ получена осредненная эмпирическая зависимость:  $L = 1,36 \cdot F^{0.56}$ .

Коэффициент разветвленности необходим при подсчетах объемов промерных работ, земляных работ при проектировании сооружений и в других случаях.

*Падение реки* – разность высот уровней истока и устья в м.

*Падение реки* на участке  $\Delta H$  - разность отметок уровня воды в двух створах 1 и 2, расположенных на расстоянии  $L$  друг от друга.

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (2.14)$$

*Уклон реки* – падение реки на единицу длины:

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\Delta H}{L} \quad (2.15)$$

Уклон выражается в десятичных дробях, процентах, промилле (0,0001, 0,001%, 0,01‰). При уклоне 0,0001 падение реки составляет 0,1 м (10 см) на 1 км длины реки, то есть 0,1 м/км.

У равнинных рек уклоны изменяются от 0,00001 до 0,001, у горных рек – от 0,001 до 0,01. Например, уклон р. Кубань в районе г. Краснодара равен 0,0001. Это нижний равнинный участок реки. В верховьях р. Кубань – горная река и ее уклон равен 0,049.

## **3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНОГО СТОКА**

### ***3.1 Количественные характеристики стока реки***

Под речным стоком понимают перемещение воды в виде потока по речному руслу, которое происходит под действием гравитации. Сток является важнейшим элементом круговорота воды в природе, с помощью которого происходит

перемещение воды с суши в океаны или области внутреннего стока.

Количественное значение стока в единицу времени называется расходом воды.

Под речным стоком подразумевается так же объем стока – объем воды (или минеральных веществ, твердый сток), прошедшей через определенный створ в единицу времени, чаще всего год. Объединяет поверхностный сток (образующийся в результате осадков и снеготаяния) и подземный сток, формируемый за счет грунтовых вод. Речной сток за год является объективным показателем для определения полноводности реки.

Согласно СП 33-101-2003, к основным гидрологическим характеристикам реки относятся:

Расход воды  $Q$ , м<sup>3</sup>/с;

Объем стока воды  $W$ , м<sup>3</sup>;

Модуль стока воды  $M$ , м<sup>3</sup>/с·км<sup>2</sup>);

Слой стока воды  $h$ , мм;

Уровень воды  $H$ , м.

Расход воды (м<sup>3</sup>/с) – количество воды, проходящее через поперечное сечение русла за единицу времени. Расход воды часто вычисляется при помощи кривой зависимости расхода от уровня и таблицы уровней (за год), составляемой для данной реки на основе измерений. При таких вычислениях составляются таблицы расходов (за год).

На основе систематических измерений расхода воды вычисляют среднесуточные, среднемесячные, среднемноголетние, а также максимальные и минимальные величины и характеристики стока. Для подсчета стока воды по данным ежесуточных измерений используется кривая расхода воды – график в прямоугольных координатах, выражающий связь между расходами и уровнями воды в данном сечении потока.

Среднемесячный расход воды вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{ср.мес.}} = \frac{\sum Q_i}{31} \quad (3.1)$$

среднегодовой:

$$Q_{\text{ср.год}} = \frac{\sum Q_i}{365} \quad (3.2)$$

Среднемноголетний (норма):

$$Q_0 = \frac{\sum Q_{\text{ср.год}i}}{n} \quad (3.3)$$

где  $n$  – число лет наблюдений.

Объем стока воды  $W$ ,  $\text{м}^3$  – количество воды, проходящее через поперечное сечение русла за некоторый промежуток времени:

$$W = Q_{(\Delta t)} \cdot \Delta t, \quad (3.4)$$

где  $Q_{(\Delta t)}$  – расход воды за период времени;

$\Delta t$  – период времени.

Обычно берутся временные интервалы  $\Delta t = 86\,400$  секунд (сутки);  $31,5 \cdot 10^6$  секунд (год). Объем стока обычно измеряется в  $\text{м}^3$  или  $\text{км}^3$ :

$$W (\text{км}^3) = W (\text{м}^3) \cdot 10^{-9}.$$

Модуль стока,  $M$   $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$  или  $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$  – расход воды  $Q$ , выраженный в  $\text{м}^3/\text{с}$ , с единицы площади речного бассейна  $F$  ( $\text{км}^2$ ):

$$M = \frac{Q_i}{F} \cdot 10^3, \text{ в } \text{л}/\text{с} \cdot \text{км}^2 \quad (3.5)$$

Слой стока  $h$ , (мм) – объем стока  $W$ , равномерно распределенный по площади речного бассейна за интервал времени:

$$h = \frac{W}{F} \cdot 10^{-3} \quad (3.6)$$

Коэффициент стока,  $\eta$  – отношение слоя стока  $h$  (мм) к осадкам  $x$  (мм) за некоторый промежуток времени:



$$\eta = \frac{h}{x} \quad (3.7)$$

Для многолетнего периода  $0 \leq \eta \leq 1$ , но в короткие периоды  $\eta$  может быть больше единицы.

### **3.2 Норма годового стока**

Одной из основных характеристик гидрологического режима рек является средняя многолетняя величина или *норма стока*.

*Нормой годового стока* называется его среднее значение за многолетний период при неизменных географических условиях и одинаковом уровне хозяйственной деятельности в бассейне реки, включающий несколько (не менее двух) четных замкнутых циклов колебаний водности.

*Норма годового стока* – среднеарифметическое значение стока за многолетний период такой продолжительности, при увеличении которого полученное среднее значение существенно не меняется. Она является важнейшей расчетной гидрологической характеристикой реки и ее бассейна.

Ряд наблюдений должен быть: однородным, то есть с неизменными физико-географическими и хозяйственными условиями; репрезентативным, или представительным, то есть включающим два и более полных циклов изменения водности реки; достаточным, то есть относительная среднеквадратическая ошибка нормы не должна превышать 10%.

В зависимости от наличия информации о режиме стока реки, норма годового стока вычисляется:

- 1) по данным непосредственных наблюдений за стоком реки за достаточно длинный период, позволяющий определить норму годового стока с заданной точностью;
- 2) путем приведения среднего стока, полученного за короткий период наблюдений, к многолетнему по длинному ряду реки–аналога;

3) при полном отсутствии наблюдений – на основе характеристик среднего годового стока, полученных в результате обобщения наблюдений на других реках данного района, и по уравнению водного баланса.

Годовой сток в каком-либо створе реки не остается постоянным во времени, так как он зависит от климатических факторов (осадков, испарения), физико-географических условий в бассейне. Колебания годового стока носят циклический характер, выражающийся в смене многоводных и маловодных лет.

*Цикл* — это сочетание многоводных, маловодных и средних по водности лет. Включение в расчетный период одной многоводной фазы дает преувеличение, только маловодной — уменьшение нормы стока. Год является многоводным, если значение среднего расхода больше нормы стока. Маловодным, если значение среднего годового расхода меньше нормы (рис.3.1)

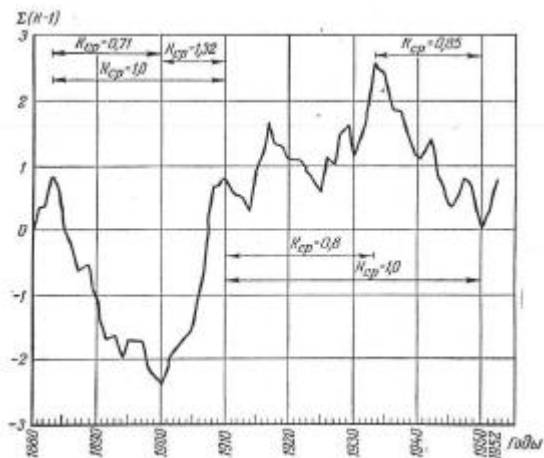


Рисунок 3.1- Разностная суммарная кривая годового стока реки

При наличии длительных (50—80 лет) наблюдений и неизменных физико-географических и хозяйственных усло-

вий, а также, если период наблюдений включает не менее двух полных циклов колебаний водности реки, величина среднего многолетнего стока вычисляется по формуле (3.8):

$$Q_0 = \frac{\sum Q_{cp.zod_i}}{n} , \quad (3.8)$$

где  $Q_0$  – норма стока,

$Q_i$  – сток за  $i$  год;

$n$  – число лет наблюдений.

Оценка репрезентативности (достаточности) ряда наблюдений определяется величиной относительной средней квадратической ошибки средней многолетней величины (нормы) годового стока, вычисляемой по формуле:

$$\varepsilon_Q = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\% , \quad (3.9)$$

где  $C_v$  – коэффициент изменчивости (вариации) годового стока.

Ряд считается достаточным, если ошибка средней многолетней величины стока находится в диапазоне  $\pm(5-10)\%$  [7].

Коэффициент изменчивости  $C_v$  характеризует отклонения величины стока за отдельные годы от нормы стока, определяется непосредственно по имеющемуся ряду наблюдений, он равен:

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{Q_0} , \quad (3.10)$$

где  $\sigma_Q$  – среднеквадратическое отклонение годовых расходов от нормы стока.

Среднее квадратическое отклонение  $\sigma_Q$  единичных значений годового стока  $Q_i$  от среднего за  $n$  лет или среднее из суммы квадратов отклонений членов ряда годовых значение

стока  $Q_i$  от их среднего значения  $Q_{0n}$  определяется по формуле:

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\Sigma(Q_i - Q_0)^2}{n}} , \quad (3.11)$$

Если  $n < 30$ , то

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\Sigma(Q_i - Q_0)^2}{n-1}} , \quad (3.11,a)$$

Для сравнения различных характеристик стока в гидрологии используют относительные безразмерные характеристики в виде модульных коэффициентов  $K$ , представляющих отношение величины стока за какой-либо период к среднему многолетнему значению стока за тот же период:

$$K = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{W_i}{W_0} = \frac{M_i}{M_0} . \quad (3.12)$$

Если выразить сток за отдельные периоды в виде модульных коэффициентов, то коэффициент изменчивости  $C_V$  вычисляется по зависимости:

$$C_V = \sqrt{\frac{\Sigma(K_i - 1)^2}{n}} , \quad (3.13)$$

а при  $n < 30$

$$C_V = \sqrt{\frac{\Sigma(K_i - 1)^2}{n-1}} . \quad (3.14)$$

Относительная средняя квадратическая ошибка коэффициента изменчивости  $C_V$  методом моментов равна:

$$\varepsilon_{C_v} = \sqrt{\frac{1+C_v^2}{2n}} \cdot 100\% . \quad (3.15)$$

Длина ряда считается достаточной для определения  $Q_0$ , если  $\varepsilon_Q \leq 5-10\%$ , а  $\varepsilon_{C_v} \leq 20\%$  при  $C_v = 0,2-0,3$ . Величина среднего многолетнего стока при этом называется нормой стока [6].

**Пример.** Определить репрезентативность ряда для определения нормы стока для реки по исходным данным представленным в таблице 3.1.

Оценку репрезентативности ряда наблюдений удобно вести с использованием программы Excel.

Таблица 3.1- Расчет коэффициента  $C_v$

№№ пп	Годы	$Q_i$	$K_i = \frac{Q_i}{Q_0}$	$K_i - 1$	$(K_i - 1)^2$
1	2	3	4	5	6
1	1936	106	1,01	0,01	0,2101
2	1937	73	0,70	-0,30	0,0936
3	1938	101	0,96	-0,04	0,0618
4	1939	153	1,46	0,46	0,0367
5	1940	125	1,19	0,19	0,0367
6	1941	62	0,59	-0,41	0,0331
7	1942	108	1,03	0,03	0,0112
8	1943	34	0,32	-0,68	0,0034
9	1944	101	0,96	-0,04	0,0024
10	1945	116	1,11	0,11	0,0015
11	1946	76	0,72	-0,28	0,0009
12	1947	110	1,05	0,05	0,0001
13	1978	103	0,98	-0,02	0,0003
14	1949	111	1,06	0,06	0,0003
15	1950	100	0,95	-0,05	0,0014
16	1951	100	0,95	-0,05	0,0014
17	1952	125	1,19	0,19	0,0022

18	1953	137	1,31	0,31	0,0022
19	1954	131	1,25	0,25	0,0759
20	1955	109	1,04	0,04	0,0925
21	1956	124	1,18	0,18	0,1673
22	1957	103	0,98	-0,02	0,4569
Сумма		2308	22,00	21,00	1,2918

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum(K_i - 1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1,2918}{21}} = 0,248$$

Определяем репрезентативность ряда по величине относительных средних квадратических ошибок годового стока  $\varepsilon_Q$  и коэффициента вариации  $\varepsilon_{Cv}$ :

$$\varepsilon_Q = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\% = \frac{0,248}{\sqrt{21}} \cdot 100 = 5,43\% < 10\%$$

$$\varepsilon_{Cv} = \sqrt{\frac{1 + C_v^2}{2n}} \cdot 100\% = \sqrt{\frac{1 + 0,248^2}{2 \cdot 22}} \cdot 100 = 15,5\% < 20\%$$

В нашем примере  $\varepsilon_Q$  и  $\varepsilon_{Cv}$  находятся в пределах допустимой погрешности, значит ряд наблюдений достаточный для определения нормы стока.

### ***3.3 Определение нормы стока при коротком ряде наблюдений методом гидрологической аналогии***

При выборе реки аналога необходимо руководствоваться следующими соображениями.

Река-аналог выбирается по:

- сходству климатических характеристик;
- синхронности колебаний стока во времени;
- однородности рельефа, почвогрунтов, гидрогеологических условий, близкой степени покрытости водосбора лесами и болотами;

– соотношению площадей водосборов, которые не должны отличаться более чем в 5 раз;

– отсутствию факторов, искажающих сток (строительство плотин, изъятие и сбросы воды).

Река-аналог должна иметь многолетний период гидрометрических наблюдений для точного определения нормы стока и не менее 6 лет параллельных наблюдений с исследуемой рекой.

*Пример.* Определить норму стока для реки Обнора в створе с. Шарна [5].

Река Обнора - с. Шарна имеет площадь водосбора  $F=1800 \text{ км}^2$ , залесенность 70%, заболоченность 1%. Среднемноголетнее количество осадков 750 мм.

Река-аналог р. Колпь - п. Верхний Двор имеет среднюю многолетнюю величину годового стока (норму)

$$M_{OA}=7,92 \text{ л/с км}^2, C_v=0,26.$$

В задании для выполнения расчетов задается река-аналог и приводятся для нее данные модулей поверхностного стока [5].

Исходные данные для построение кривой связи модулей поверхностного стока представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 –Модули стока р. Обнора и р. Колпь [5]

Река	М, л/с км <sup>2</sup> за годы параллельных наблюдений									
	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Обнора	7,3	8,0	9,4	6,8	5,6	4,7	4,7	7,8	6,0	8,7
Колпь	8,7	7,8	10,2	6,4	6,5	4,2	3,9	6,0	6,1	8,9

Для определения нормы стока исследуемой реки на миллиметровке строится график связи модулей стока исследуемой реки и реки-аналога (рис. 3.2).

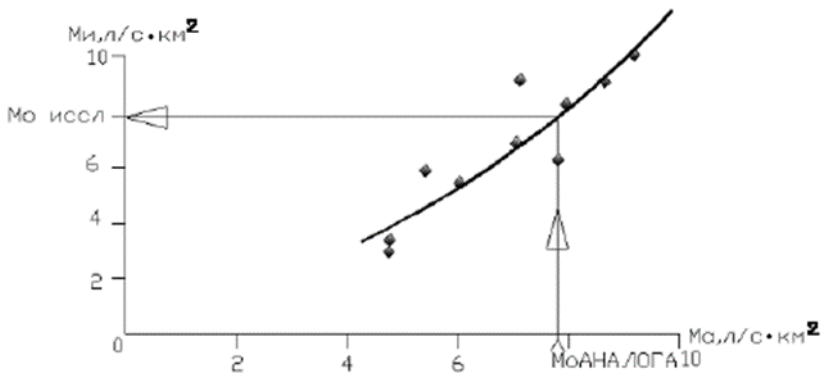


Рисунок 3.2 – График связи модулей стока исследуемой реки и реки аналога

Для построения графика за годы параллельных наблюдений наносят точки. Затем строится график связи в виде линии, осредняющей точки. Зависимости считаются удовлетворительными, если отклонения большей части точек от средней линии

не превышают  $\pm 15\%$ . Затем, по известной норме стока реки-аналога  $M_{oa}$  и кривой зависимости определяют норму стока исследуемой реки  $M_{ou}$ , выраженную через модуль стока и через нее вычисляют норму стока в виде расхода  $Q_o$ .

По графику связи среднегодовых модулей стока р. Обнора и р. Колпь для известной нормы стока реки-аналога  $M_{oa} = 7,92 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ , находим соответствующее значение нормы стока для исследуемой реки  $M_{ou} = 7,95 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ , а затем определяем норма годового стока исследуемой реки по формуле:

$$Q_{ou} = \frac{M_{ou} \cdot F}{10^3} = \frac{7,95 \cdot 1800}{10^3} = 14,31 \text{ м}^3 / \text{с}$$



Коэффициент изменчивости годового стока для исследуемой реки вычисляем по формуле:

$$C_{vu} = A \frac{M_{0a}}{M_{0u}} \cdot C_{va},$$

где  $C_{vu}$  – коэффициент изменчивости стока в расчетном створе;

$C_{va}$  – в створе реки-аналога;

$M_{0a}$  – среднегодовое значение годового стока реки-аналога;

$M_{0u}$  – норма стока исследуемой реки;

$A$  – тангенс угла наклона графика связи. В рассматриваемом примере:

$$C_{vu} = \frac{7,95}{7,92 \cdot 0,26} = 0,27,$$

Окончательно принимаем для исследуемой реки:  
 $M_o = 7,95$  л/(с·км<sup>2</sup>),  $Q_o = 14,3$  м<sup>3</sup>/с,  $C_v = 0,27$ .

### ***3.4 Построение кривой обеспеченности годового стока***

Для характеристики возможных колебаний стока за длительный период и определения расчетных расходов в гидрологии применяют аналитические кривые обеспеченности: биномиальную кривую обеспеченности и кривую гамма-распределения. Они определяются следующими параметрами:  $Q_o$  – средней величиной годового расхода,  $C_v$  – коэффициентом изменчивости (вариации) и  $C_s$  – коэффициентом асимметрии.

Для построения кривой обеспеченности годового стока, используют кривые трехпараметрического гамма-

распределения. Для этого необходимо рассчитать три параметра:  $Q_o$  - среднюю многолетнюю величину (норму) годового стока,  $C_v$  и  $C_s$  годового стока.

Расчет параметров кривой обеспеченности удобно выполнять в табличной форме с использованием Microsoft Office. (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Расчет параметров кривой обеспеченности максимальных расходов

Годы	№№ пп	$Q_i$	$Q_i$ убыв.	$P=(m/n+1)100$	$K=Q_i/Q_{ср}$	K-1	(K-1) <sup>2</sup>
1936	1	106	153	4,35	1,46	0,46	0,2101
1937	2	73	137	8,70	1,31	0,31	0,0936
1938	3	101	131	13,04	1,25	0,25	0,0618
1939	4	153	125	17,39	1,19	0,19	0,0367
1940	5	125	125	21,74	1,19	0,19	0,0367
1941	6	62	124	26,09	1,18	0,18	0,0331
1942	7	108	116	30,43	1,11	0,11	0,0112
1943	8	34	111	34,78	1,06	0,06	0,0034
1944	9	101	110	39,13	1,05	0,05	0,0024
1945	10	116	109	43,48	1,04	0,04	0,0015
1946	11	76	108	47,83	1,03	0,03	0,0009
1947	12	110	106	52,17	1,01	0,01	0,0001
1978	13	103	103	56,52	0,98	-0,02	0,0003
1949	14	111	103	60,87	0,98	-0,02	0,0003
1950	15	100	101	65,22	0,96	-0,04	0,0014
1951	16	100	101	69,57	0,96	-0,04	0,0014
1952	17	125	100	73,91	0,95	-0,05	0,0022
1953	18	137	100	78,26	0,95	-0,05	0,0022
1954	19	131	76	82,61	0,72	-0,28	0,0759
1955	20	109	73	86,96	0,70	-0,30	0,0925
1956	21	124	62	91,30	0,59	-0,41	0,1673
1957	22	103	34	95,65	0,32	-0,68	0,4569
сумма		2308	2308		21,99981	-0,00019	1,2918
средн		<b>104,9091</b>					
(K-1)/21							0,0615
$C_v$							<b>0,248022</b>

*Обеспеченностью гидрологической* величины называется вероятность превышения рассматриваемого значения гидрологической величины среди совокупности всех возможных ее значений:

$$P = \frac{m}{(n+1)} \cdot 100\% . \quad (3.16)$$

где  $P$  – обеспеченность члена ряда, расположенного в порядке убывания;

$m$  – порядковый номер члена ряда;

$n$  – число членов ряда.

Коэффициент асимметрии  $C_s$  характеризует несимметричность гидрологического ряда и определяется путем подбора, исходя из условия наилучшего соответствия аналитической кривой с точками фактических наблюдений. для рек, расположенных в равнинных условиях, при расчете годового стока наилучшие результаты дает соотношение  $C_s = 2C_v$ .

После построения аналитической кривой обеспеченности на клетчатке вероятностей, необходимо проверить принятое соотношение  $C_s = 2C_v$ . Для этого по данным таблицы 3.1 строится вспомогательная таблица 3.3. Модульные коэффициенты годовых расходов (из табл. 3.1, графа 4) необходимо расположить по убыванию (табл. 3.3) и для каждого из них вычислить его фактическую обеспеченность по формуле:

$$P = \frac{m}{(n+1)} \cdot 100\% . \quad (3.17)$$

По данным таблицы 3.3 на клетчатке вероятности или на миллиметровке наносятся точки ординат аналитической кривой обеспеченности, откладывая по оси абсцисс  $P\%$ , а по оси ординат модульные коэффициенты  $K_p$ .

Кривые обеспеченности, построенные на клетчатке вероятностей (рис. 3.3) имеют плавный вид и удобны в пользовании, особенно в области 1-5% 95-99% обеспеченности.

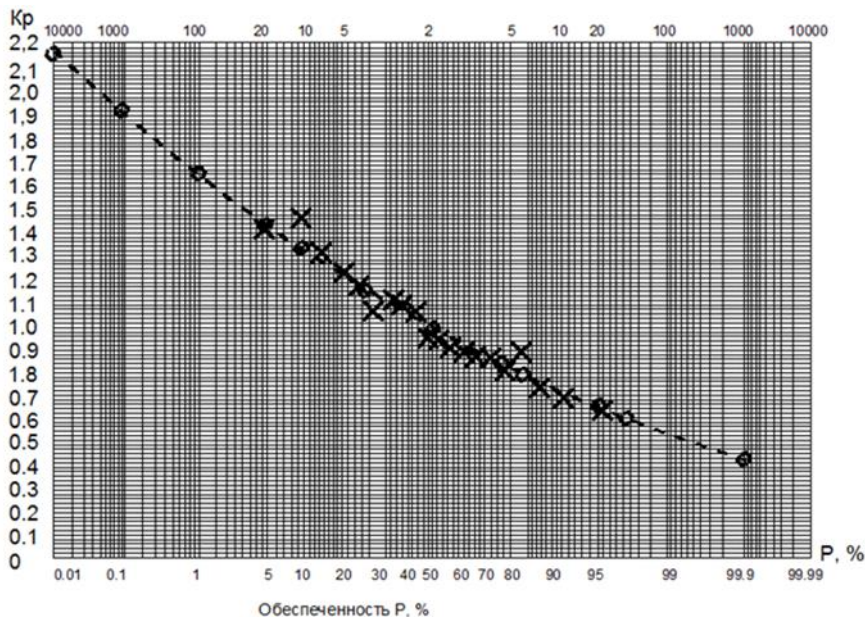


Рисунок 3.3 – Аналитическая кривая обеспеченности стока

**Пример.** Используя результаты расчетов таблицы 3.3 имеем  $Q_o=104,91 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $C_v = 0,24$ . Принимаем  $C_s = 2C_v$  с последующей проверкой эмпирическими точками (таблица 3.3, графы 5,6).

Ординаты кривой обеспеченности определяем в зависимости от коэффициента  $C_v$  (в примере  $C_v = 0,24$ ) по таблицам, составленным С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем для  $C_s = 2C_v$  (Приложение 2). Для повышения точности определения точек аналитической кривой необходимо учитывать сотые доли  $C_v$  и провести интерполяцию между соседними столбцами цифр.

В таблице 3.4 представлены, определенные ординаты аналитической кривой обеспеченности по справочной таблице Приложение 2.

Таблица 3.4 - Ординаты аналитической кривой обеспеченности среднегодовых расходов воды реки при  $C_V = 0,24$ ,  $C_S = 2 C_V$ .

P, %	0,01	0,1	1	5	10	25	50	75	90	95	99
$K_p$	2,24	1,93	1,72	1,45	1,33	1,15	0,98	0,82	0,70	0,62	0,52

Для проверки аналитической кривой, используем данные таблицы 3.3, графы 5 и 6. Данные из таблицы наносят на график и проводят анализ расположения точек относительно аналитической кривой. Как видно на рисунке 3.3, нанесенные точки осредняют аналитическую кривую; значит кривая построена правильно и соотношение  $C_S = 2C_V$  соответствует действительности и кривую обеспеченности можно использовать для расчетов. В противном случае необходимо изменить соотношение  $C_S$  к  $C_V$  и вновь построить аналитическую кривую обеспеченности.

### ***3.5 Определение нормы стока и расчетных расходов воды различной обеспеченности***

*Цель работы:* научиться определять норму годового стока и расчетные расходы воды различной обеспеченности, используя стандартные средства Microsoft Office.

*Задание к работе:*

1. По данным приложения 2 вычислить норму стока (вариант 1 – столбец Q1, вариант 2 – Q2 и т.д.).
2. Вычислить характеристики изменчивости годового стока и сделать вывод по определению нормы годового стока.
3. Определить расчетные расходы воды обеспеченностью 1, 50, 99%.

Исходные данные по вариантам представлены в Приложении 1, Таблицы П.1 – П.2.

***Порядок выполнения работы:***

*Норма годового стока* — это среднее арифметическое значение годового стока за многолетний период такой продолжительности, при увеличении которой полученное среднее значение существенно не меняется, и вычисляется по формуле (3.3). При этом необходимо выполнение следующих условий, если:

- в течение всего периода не изменялись физико-географические и хозяйственные условия в бассейне реки;
- период наблюдений включает два или более полных циклов водности.

Чем длиннее ряд наблюдений, тем точнее вычисляется норма. Однако для северных районов, где изменчивость стока невелика, ряд наблюдений может быть короче, чем для засушливых южных районов, где изменчивость стока значительна.

В колебаниях годового стока, как и в колебаниях годовых осадков, прослеживается цикличность, смена многоводных и маловодных фаз, причинами которых являются циклические колебания климата.

*Цикл* — это сочетание многоводной и маловодной фаз и лет средней водности; длительность циклов неодинакова, а среднее значение стока за цикл близко к норме. Если в период наблюдений входит целый цикл и еще, например, многоводная фаза, то среднее арифметическое значение будет завышено по сравнению с истинной нормой стока, а если маловодная — то занижено. Поэтому ***в период для определения нормы стока включают полные законченные циклы***, а отдельные фазы исключают. Репрезентативность (представительность) ряда (при  $n > 50$  лет) наблюдений определяется (рис. 3.4) по разностным интегральным кривым.

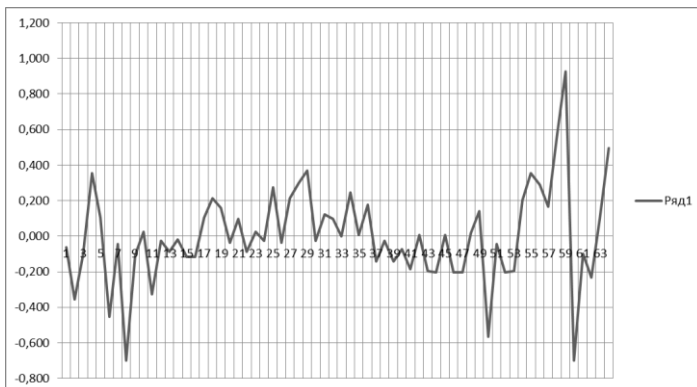


Рисунок 3.4 – Разностная интегральная кривая

Для построения такой кривой последовательно суммируют отклонения модульных коэффициентов «К» от среднего значения, равного единице (таблица 3.5).

Вычисления удобнее производить в электронных таблицах программы Microsoft Excel. В первый и второй столбец заносят значения года - «Год» и соответствующего ему расхода воды – « $Q_i$ ». Внизу под расходами воды располагаются ячейки в которые заносятся формулы для вычисления суммы расходов за период, и среднее значение расхода. После заполнения исходных данных вычисления выполняются автоматически.

В четвертом столбце производится автоматическое вычисление модульных коэффициентов «К». Для этого в ячейку записывается формулу для расчета « $K = Q_i / Q_{\text{ср.год}}$ » и ее копируют на весь столбец.

Аналогичным образом производятся автоматические вычисления в 5 и 6 столбцах, после записи формул расчета в соответствующие ячейки для этих столбцов.

Таблица 3.5 – Построение разностной кривой

№№ пп	Годы	$Q_i$	$K_i = \frac{Q_i}{Q_0}$	$K_{i-1}$	$\Sigma(K_{i-1})$
1	2	3	4	5	6
1	1936	106	1,01	0,01	0,01
2	1937	73	0,70	-0,30	-0,29
3	1938	101	0,96	-0,04	-0,33
4	1939	153	1,46	0,46	0,13
5	1940	125	1,19	0,19	0,32
6	1941	62	0,59	-0,41	-0,09
7	1942	108	1,03	0,03	-0,06
8	1943	34	0,32	-0,68	-0,74
9	1944	101	0,96	-0,04	-0,77
10	1945	116	1,11	0,11	-0,67
11	1946	76	0,72	-0,28	-0,94
12	1947	110	1,05	0,05	-0,90
13	1978	103	0,98	-0,02	-0,91
14	1949	111	1,06	0,06	-0,86
15	1950	100	0,95	-0,05	-0,90
16	1951	100	0,95	-0,05	-0,95
17	1952	125	1,19	0,19	-0,76
18	1953	137	1,31	0,31	-0,45
19	1954	131	1,25	0,25	-0,20
20	1955	109	1,04	0,04	-0,16
21	1956	124	1,18	0,18	0,02
22	1957	103	0,98	-0,02	-0,00
Сумма		2308	22,00	21,00	
Среднее		104,909			
Среднее за цикл		104,2353			

Для построения разностно-интегральной кривой можно воспользоваться мастером диаграмм из программы Microsoft Excel, выделив столбцы с данными «Год» и « $\Sigma(K-1)$ » рисунок 3.5.



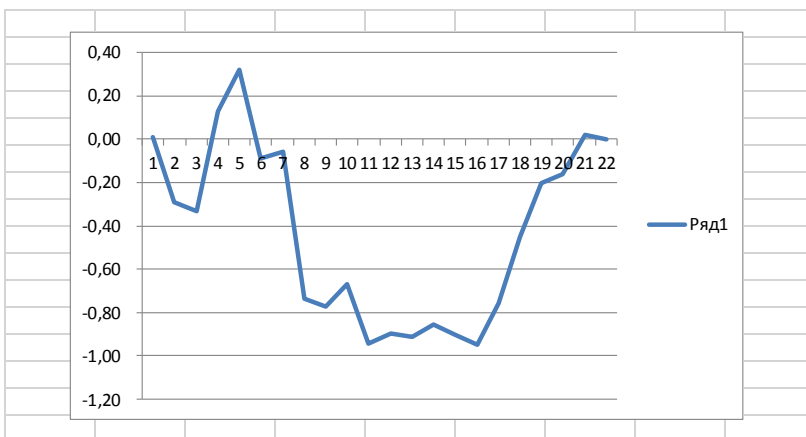


Рисунок 3.5 – Разностная интегральная кривая

Пример выполнения задания в программе Microsoft Excel, представлен на рисунке 3.6.

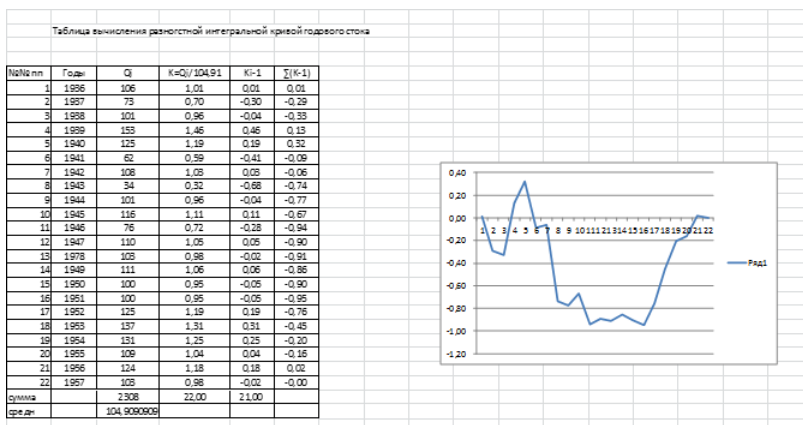


Рисунок 3.6 – Пример выполнения задания в Microsoft Excel

Период времени, в котором разностная интегральная кривая идет вверх (хотя бы имеет общую тенденцию), а  $\Sigma(K-1)$  – положительная величина, соответствует многоводной фазе (рис. 3.6); период, в котором кривая наклонена вниз, а  $\Sigma(K-1)$  – отрицательная, соответствует маловодной фазе. Начало и конец циклов удобно определять по переломам кривой. Пользуясь этим по разностно-интегральной кривой легко выделить начало и конец каждого цикла и установить продолжительность расчетного периода, по которому следует определять норму стока.

Так, в рассматриваемом примере, для исходного ряда наблюдений на рисунка 3.4 построена разностная кривая. В нашем примере период наблюдений включает в себя 1 полный цикла водности. Для более точного определения расхода необходимо не менее 2 циклов, поэтому если есть возможность, то ряд необходимо продлить.

Для определения точек цикла, достаточно подвести мышк к точке и на графике высветятся координаты: порядковый номер и значение  $K_p$ . Для нашего примера это 1940 г. и 1951 г., а весь период 1940 - 1951 гг.

В расчетный период включают только полные циклы, поэтому в данном случае нормой стока будет являться среднее арифметическое значение расхода –  $Q_{cp}$ , вычисленного за период 1940-51 гг.  $104,2353 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Проверка вычислений в таблице:

- сумма модульных коэффициентов должна быть равна количеству лет наблюдений  $\Sigma K = n$ , а  $\Sigma(K-1) = 0$ , либо возможна невязка  $\pm 0,05$ .

Мерой изменчивости (рассеяния) значений исследуемого ряда служит среднее квадратическое отклонение –  $\sigma$ , для возможности сравнения отдельных рядов вычисляют коэффициент изменчивости (вариации), которые вычисляются по уже известным формулам с помощью программы Microsoft Excel, пример заполнения – таблица 3.1.

По формулам 3.9-3.15 определяются средние квадратические ошибки  $\varepsilon_Q$  и  $\varepsilon_{Cv}$ , делается вывод о допустимости использования данного ряда наблюдений при определении нормы стока.

**Определение расходов заданной обеспеченности.** Для вычисления воспользуемся данными таблицы 3,3 и графиком на рисунке 3.2. Расход заданной обеспеченности определяется по формуле:

$$Q_{P\%} = K_{P\%} \cdot Q_0 \quad (3.17)$$

где  $Q_0$  – норма годового стока,  $m^3/c$ ;

$K_{P\%}$  – модульный коэффициент при обеспеченности  $P\%$ .

Значение модульного коэффициента определяем по таблице 3.4. Так для  $P=1\%$   $K_{1\%} = 1,72$ ,  $P=50\%$   $K_{50\%} = 0,98$ ,  $P=99\%$   $K_{99\%} = 0,52$ . Значения обеспеченных расходов вычисленные по формуле 3.16 равны:

$$Q_{1\%} = 1,72 \cdot 104,24 = 179,29 m^3 / c$$

$$Q_{50\%} = 0,98 \cdot 104,24 = 102,16 m^3 / c$$

$$Q_{99\%} = 0,52 \cdot 104,24 = 50,20 m^3 / c$$

С помощью кривой обеспеченности можно решить и обратную задачу – вычислить обеспеченность расхода воды конкретного года.

Например, в 1950 году среднегодовой расход воды реки составил  $100 m^3/c$ , если норма стока  $104,24 m^3/c$  и коэффициент вариации равен  $0,24$  то, вычислив модульный коэффициент:

$$K_{1950} = \frac{100,00}{104,24} = 0,96$$

находим по приложению 2 (или с помощью аналитической кривой обеспеченности) обеспеченность расхода воды 1950 года –  $65\%$ .

### 3.6 Определение максимальных расходов при наличии данных наблюдений

При проектировании гидротехнических сооружений определении максимальных расчетных расходов выполняют для заданной расчетной обеспеченности, которая принимают в зависимости от класса капитальности сооружений. При проектировании сооружений 1-го класса капитальности, рассчитываемых на расход обеспеченностью  $P = 0,01\%$  к максимальному расходу  $Q_{p \max}$ , определенному по формуле (3.18):

$$Q_{p \max} = K_{0,01\%} \cdot Q_{0 \max} , \quad (3.18)$$

прибавляют гарантийную поправку  $\Delta Q_{p,}$ , а расчетный расход определяют с помощью формулы:

$$Q_{p \max}^* = Q_{p \max} + \Delta Q_{p \max} . \quad (3.19)$$

Величина гарантийной поправки определяется по формуле:

$$\Delta Q_{p \max} = Q_{p \max} \frac{aE_p}{\sqrt{n}} , \quad (3.20)$$

где  $Q_{p \max}$  – максимальный расход воды, определенный по кривой обеспеченности,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$a$  – коэффициент, характеризующий гидрологическую изученность бассейна;  $a = 0,7$  для рек, расположенных в гидрологически изученных районах,  $a = 1,5$  для рек, расположенных в слабо изученных районах;

$n$  – число лет наблюдений;

$E_p$  – относительная среднеквадратическая ошибка ординаты кривой обеспеченности, определяемая по СНиП 2.01.14-83 (приложение 5), зависит от  $C_v$  и расчетной обеспеченности. Гарантийная поправка не должна превышать 20% от расчетного расхода  $Q_{pmax}$ . Если  $\Delta Q_p \geq 0,2Q_{pmax}$ , то данных наблюдений недостаточно и ряд наблюдений необходимо удлинить ряд или определить  $Q_{pmax}$  другим методом.

### **3.7 Определение максимумов весенних половодий и дождевых паводков при отсутствии данных наблюдений**

Гидрологические расчеты для небольших рек, где отсутствуют режимные гидрологические наблюдения выполняются в соответствии с рекомендациями СНиП 2.01.14-83 [2].

Расходы водотоков, принимающих сток с относящейся к ним водосборной площади, изменяются как в течение года по отдельным его периодам, так и в различные годы. Типичный гидрограф стока характеризуется наличием осенне-зимнего минимума, весеннего половодья, связанного со снеготаянием, летнего меженного минимума и летне-осенних паводков, происходящих от затяжных или ливневых дождей.

Расчетные периоды (критические и поверочные) устанавливаются в зависимости от характера использования земель в соответствии со СНиП 11-52-74 п.5.6. Критическим называется период, в котором переувлажнение земель является наиболее опасным.

**Весенний паводковый период.** Максимальный расход талых вод для равнинных бассейнов определяют по формуле:

$$Q_{В.П.} = \frac{K_0 \cdot h_p \cdot \mu \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2}{(F + 1)^{0,17}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.21)$$

где:  $K_0$  – коэффициент дружности половодья,  $K_0 = 0,006–0,008$ , для равнинных бассейнов  $K_0 = 0,006$ ;

$h_p$  – расчетный слой суммарного стока половодья заданной обеспеченности, мм;

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

$\delta$  – коэффициент озерности, при площади озер ( $F_{оз}$ ) на водосборе менее 2 %  $\delta = 1$ , при  $F_{оз} > 2\%$   $\delta = 0,8$ ;

$\delta_1$  – коэффициент, учитывающий регулирующее влияние водохранилищ и прудов,  $\delta_1 = 0,9$ ; при их отсутствии  $\delta_1 = 1$ ;

$\delta_2$  – коэффициент, учитывающий залесенность и заболоченность

$$\delta_2 = 1 - 0,8 \cdot \lg \cdot (0,05 \cdot f_l + 0,1 \cdot f_b + 1) , \quad (3.22)$$

$f_l$  и  $f_b$  – площадь лесов и болот на водосборе, %;

$\mu$  – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов воды.

Расчетный слой суммарного стока половодья заданной обеспеченности ( $h_p$ , мм) определяют по трем параметрам:

$$h_p = (1 + \Phi \cdot C_v) \cdot \bar{h} , \quad (3.23)$$

где  $\bar{h}$  – средний слой стока половодья (мм) определяется по формуле:

$$\bar{h} = h_0 \cdot K_c , \text{ мм,}$$

$h_0$  – среднемноголетний слой весеннего стока (мм) определяется по картам;

$K_c$  – коэффициент, учитывающий условия стока, для территории с плоским рельефом и песчаными почвами  $K_c = 0,9$ ; для холмистого рельефа и глинистых почв  $K_c = 1,1$ ;

$C_v$  – коэффициент изменчивости (вариации) слоя стока, определяют по картам изолиний.

Коэффициент асимметрии  $C_s = 2C_v$ ;

$\Phi$  – ордината кривой трехпараметрического гаммараспределителя при  $C_s = 2C_v$ .

Расчет противоэрозионных сооружений выполняется для расчетной обеспеченности 10 %. Исходя из рекомендаций СНиП и для условий Краснодарского края, в расчетных формулах приняты следующие величины:

–  $K_0 = 0,006$

– коэффициенты  $\delta, \delta_1$  равны 1,0, так как на территории озера, водохранилища они отсутствуют;

–  $f_{\text{л}} = 15 \%$ ,  $f_{\text{б}} = 0$ .

–  $h_0 = 20$  мм,  $K_c = 1,1$ ;  $C_v = 0,6$ ,  $C_s = 2C_v = 1,2$   $\Phi = 1,8$   
 $\mu = 0,89$ .

Расчеты по формуле (3.1) сведены в таблицу 2.

**Предпосевной период.** Максимальный расход воды в предпосевной период определяют по формуле:

$$Q_{\text{ПР}} = q_{\text{нр}} \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.24)$$

где  $q_{\text{нр}}$  – модуль стока предпосевого периода ориентированно может быть вычислен через модуль максимального стока весеннего половодья ( $q_{\text{вп}}$ ):

$$q_{\text{нр}} = K \cdot Q_{\text{В.П.}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.25)$$

где  $K$  – коэффициент определяется по формуле П.А. Дудкина: для пологих водосборов с преобладанием песчаных и торфяных почв:

$$K = \frac{3,63}{T^{0,2}} - 1,64, \quad (3.26)$$

где  $T$  – допустимое время весеннего затопления, для полевых севооборотов и пастбищ  $T = 5-15$  сут: для лугов и сенокосов  $T = 15-20$  сут, принимаем 15 сут.

**Летне-паводковый период.** Эмпирическая редуционная формула для определения максимального расхода воды дождевых паводков имеет вид:

$$Q_{Л.П.} = q_{л.п.} \cdot F = q_{200} \cdot \left( \frac{200}{F} \right)^n \cdot \lambda_p \cdot \delta \cdot \delta'_2 \cdot F, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.27)$$

где  $q_{200}$  – модуль максимального расхода воды вероятностью ежегодного превышения 1 %, приведенный к площади водосбора 200 км<sup>2</sup> (м<sup>3</sup>/с км<sup>2</sup>);

$n$  – показатель степени редукиции модуля максимального расхода;

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

$\lambda_p$  – переходный коэффициент от вероятности превышения 1 % к другой вероятности;

$\delta$  – коэффициент озерности, учитывающий снижение максимального стока рек, зарегулированных проточными озерами или прудами;

$\delta'_2$  – коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода вследствие заболоченности, определяется по формуле:

$$\delta'_2 = 1 - \beta \cdot \lg(0,1 \cdot F_B + 1), \quad (3.28)$$

где  $\beta$  – коэффициент, зависящий от типа болот;

$\beta = 0,8$  – низинные болота и заболоченные леса и луга на водосборах, сложенных супесчаными и легкосуглинистыми почвогрунтами;

$\beta = 0,7$  – водосборы с болотами разных типов;

$\beta = 0,5$  – верховые болота на водосборах, сложенных глинистыми и среднесуглинистыми почвогрунтами;

$F_B$  – площадь болот, заболоченных лесов и лугов в бассейне, %.



В расчетах для условий Краснодарского края и площади бассейнов менее 1 км определены следующие расчетные величины:

- $q_{200\text{ м}} = 1,0 \text{ м}^3/\text{с км}^2$ ;
- $\lambda_p = 0,23$  для обеспеченности 10 % и IV района.
- $\delta, \delta'_2$  равны 1,0.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение длины реки, ее притоков
2. Охарактеризуйте исток и устье реки.
3. Что представляет собой гидрографическая схема реки?
4. Что такое уклон реки, коэффициенты извилистости и густоты речной сети?
5. Что такое площадь бассейна и чем она отличается от площади водосбора?
6. Что такое водораздельная линия?
7. Охарактеризуйте длину, среднюю ширину и среднюю высоту бассейна.
8. В чем сущность коэффициента развития водораздельной линии?
9. Что показывает коэффициент вытянутости водосбора, средняя высота и его уклон ?
10. Что называется повторяемостью (вероятностью) гидрологической величины?
11. Что называется обеспеченностью (вероятностью превышения) гидрологической величины?
12. Какие характерные точки имеет кривая распределения?
13. При каком соотношении  $C_s/C_v$  биномиальная кривая неприменима для расчетов стока?
14. Как построить аналитическую кривую обеспеченности?
15. Какие параметры и таблицы необходимы для построения аналитической кривой обеспеченности?
16. Как определяется норма стока при недостаточности или

отсутствии данных наблюдений?

17. Что такое норма годового стока?

18. Как строится и для чего необходима разностная интегральная кривая?

19. Что такое расходы воды обеспеченностью 1, 50, 99%, какой из них больше?

20. Что характеризуют коэффициенты вариации и асимметрии?

21. Для чего строят кривые обеспеченности расходов?

22. Какой период наблюдений необходим для вычисления средней многолетней величины как средней арифметической годовых величин стока?

23. Как выбрать бассейн-аналог при недостаточности гидрометрических данных?

24. Как определить норму стока при отсутствии данных наблюдений за стоком?

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняков г. В., Овчаров Е. Е. Инженерная гидрология и регулирование стока: Учебник. – М.: Колос, 1993.
2. Железняков Г. В., Неговская Т. А., Овчаров Е. Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока. – М.: Колос, 1984.
3. Иванов А. Н., Неговская Т. А. Гидрология и регулирование стока. – М.: Колос, 1979.
6. Папенко И. Н., Ткаченко В.Т. Неищенко А.А. Методическое пособие по изучению дисциплины «Инженерная гидрология» и выполнению контрольных работ студентами заочной формы обучения: Учебно-методическое пособие. – Краснодар: КубГАУ, 2011.
7. Практикум по гидрологии и регулированию стока. / Дьяченко Н. П., Папенко И. Н.; Кубан. гос. аграр. ун-т. – Краснодар, 2008.
8. Чеботарев А.И. Общая гидрология. – Л., Гидрометеоздат, 1975.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Общие сведения.....	4
1.1 Предмет и метод в гидрологии.....	4
1.2 Виды земных вод.....	6
1.3 Круговорот воды в природе.....	7
2 Характеристика реки и ее бассейна.....	10
2.1 Реки и их типы.....	10
2.2 Водосбор и бассейн реки.....	15
2.3 Речная гидрографическая сеть.....	22
3 Определение характеристик речного стока.....	30
3.1 Количественные характеристики стока реки.....	30
3.2 Норма годового стока.....	33
3.3 Определение нормы стока при коротком ряде наблюдений методом гидрологической аналогии.....	38
3.4 Построение кривой обеспеченности годового стока.....	41
3.5 Определение нормы стока и расчетных расходов воды различной обеспеченности.....	45
3.6 Определение максимальных расходов при наличии данных наблюдений.....	52
3.7 Определение максимумов весенних половодий и дождевых паводков при отсутствии данных наблюдений.....	53
Вопросы для самоконтроля.....	57
Список литературы.....	59
Приложения.....	61

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Исходные данные для расчета нормы годового стока – Q, м<sup>3</sup>/с

*Варианты 1-11*

Таблица П.1

Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с по вариантам										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1936	106	220	61	148	428	309	123	102	241	83	246
1937	73	151	42	101	293	211	84	70	165	57	168
1938	101	209	58	140	406	293	116	96	229	78	233
1939	153	318	88	214	618	445	177	147	348	119	355
1940	125	260	72	175	505	364	144	120	284	97	290
1941	62	128	35	86	249	179	71	59	140	48	143
1942	108	223	61	150	433	312	124	103	244	84	249
1943	34	70	19	47	135	98	39	32	76	26	78
1944	101	209	58	140	406	293	116	96	229	78	233
1945	116	241	67	162	469	338	134	111	264	90	269
1946	76	158	44	106	307	221	88	73	173	59	176
1947	110	227	63	153	442	319	126	105	249	85	254
1948	103	213	59	144	415	299	119	98	234	80	238
1949	111	230	63	154	446	322	128	106	251	86	256
1950	100	206	57	139	401	289	115	95	226	77	231
1951	100	206	57	139	401	289	115	95	226	77	231
1952	125	260	72	175	505	364	144	120	284	97	290
1953	137	283	78	190	550	397	157	131	310	106	316
1954	131	271	75	183	528	380	151	125	297	102	303
1955	109	225	62	151	437	315	125	104	246	84	251
1956	124	258	71	173	501	361	143	119	282	97	287
1957	103	213	59	144	415	299	119	98	234	80	238
1958	116	241	67	162	469	338	134	111	264	90	269
1959	110	227	63	153	442	319	126	105	249	85	254

Продолжение таблицы П.1

Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с по вариантам										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1960	144	299	83	201	582	419	166	138	328	112	334
1961	109	225	62	151	437	315	125	104	246	84	251
1962	137	283	78	190	550	397	157	131	310	106	316
1963	147	304	84	204	591	426	169	140	333	114	339
1964	155	320	88	215	622	449	178	148	351	120	357
1965	110	227	63	153	442	319	126	105	249	85	254
1966	127	262	72	176	510	367	146	121	287	98	293
1967	124	258	71	173	501	361	143	119	282	97	287
1968	113	234	65	158	456	328	130	108	257	88	262
1969	141	292	81	197	568	410	163	135	320	110	326
1970	114	237	65	159	460	332	132	109	259	89	264
1971	133	276	76	186	537	387	154	127	302	104	308
1972	97	202	56	136	392	283	112	93	221	76	225
1973	110	227	63	153	442	319	126	105	249	85	254
1974	97	202	56	136	392	283	112	93	221	76	225
1975	105	218	60	147	424	306	121	101	239	82	243
1976	92	190	52	128	370	267	106	88	208	71	212
1977	114	237	65	159	460	332	132	109	259	89	264
1978	91	188	52	126	365	263	104	87	206	70	210
1979	90	186	51	125	361	260	103	86	203	70	207
1980	114	237	65	159	460	332	132	109	259	89	264
1981	90	186	51	125	361	260	103	86	203	70	207
1982	90	186	51	125	361	260	103	86	203	70	207
1983	115	239	66	161	465	335	133	110	262	90	267
1984	129	267	74	179	519	374	148	123	292	100	298
1985	49	102	28	69	198	143	57	47	112	38	114
1986	108	223	61	150	433	312	124	103	244	84	249

Продолжение таблицы П.1

Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с по вариантам										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1987	90	186	51	125	361	260	103	86	203	70	207
1988	91	188	52	126	365	263	104	87	206	70	210
1989	136	281	77	189	546	393	156	129	307	105	313
1990	153	318	88	214	618	445	177	147	348	119	355
1991	146	302	83	203	586	423	168	139	330	113	337
1992	132	274	76	184	532	384	152	126	300	103	306
1993	178	369	102	248	717	517	205	170	404	138	412
1994	218	452	125	304	879	634	252	209	495	170	505
1995	34	70	19	47	135	98	39	32	76	26	78
1996	102	211	58	142	410	296	117	97	231	79	236
1997	87	181	50	122	352	254	101	83	198	68	202
1998	124	258	71	173	501	361	143	119	282	97	287
1999	169	350	97	236	681	491	338	199	387	374	530

## Варианты 12 - 22

Таблица П.2

Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с по вариантам										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1936	213	125	243	236	333	362	878	611	540	713	241
1937	146	86	166	161	228	248	601	418	369	488	165
1938	202	119	230	223	316	343	832	579	511	676	229
1939	307	181	351	340	481	522	1266	881	778	1029	348
1940	251	148	286	278	393	426	1034	720	636	840	284
1941	123	73	141	137	193	210	509	354	313	414	140
1942	215	127	246	238	337	366	887	617	545	721	244
1943	67	40	77	74	105	114	277	193	170	225	76
1944	202	119	230	223	316	343	832	579	511	676	229
1945	233	137	266	258	365	396	961	669	591	781	264
1946	152	90	174	169	239	259	628	437	386	511	173
1947	220	129	251	243	344	373	906	630	557	736	249
1948	206	121	236	228	323	351	850	592	523	691	234
1949	222	131	253	246	347	377	915	637	562	743	251
1950	199	117	228	221	312	339	822	572	506	668	226
1951	199	117	228	221	312	339	822	572	506	668	226
1952	251	148	287	278	393	427	1035	720	636	841	284
1953	273	161	312	303	428	465	1127	784	693	916	310
1954	262	154	300	290	411	446	1081	752	665	879	297
1955	217	128	248	241	340	370	896	624	551	728	246
1956	249	147	284	275	390	423	1026	714	630	834	282
1957	206	121	236	228	323	351	850	592	523	691	234
1958	233	137	266	258	365	396	961	669	591	781	264
1959	220	129	251	243	344	373	906	630	557	736	249



Продолжение таблицы П.2

Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с по вариантам										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1960	289	170	330	320	453	491	1192	829	733	969	328
1961	217	128	248	241	340	370	896	624	551	728	246
1962	273	161	312	303	428	465	1127	784	693	916	310
1963	293	173	335	325	460	499	1210	842	744	984	333
1964	309	182	353	342	484	526	1275	887	784	1036	351
1965	220	129	251	243	344	373	906	630	557	736	249
1966	253	149	289	280	397	431	1044	727	642	849	287
1967	249	147	284	275	390	423	1026	714	630	834	282
1968	226	133	259	250	355	385	933	649	574	759	257
1969	282	166	323	312	442	480	1164	810	716	946	320
1970	228	135	261	253	358	389	942	656	579	766	259
1971	267	157	305	295	418	453	1100	765	676	894	302
1972	195	115	223	216	305	331	804	559	494	653	221
1973	220	129	251	243	344	373	906	630	557	736	249
1974	195	115	223	216	305	331	804	559	494	653	221
1975	211	124	241	233	330	358	869	604	534	706	239
1976	184	108	210	203	288	312	758	527	466	616	208
1977	228	135	261	253	358	389	942	656	579	766	259
1978	181	107	207	201	284	309	748	521	460	608	206
1979	179	106	205	198	281	305	739	514	454	601	203
1980	228	135	261	253	358	389	942	656	579	766	259
1981	179	106	205	198	281	305	739	514	454	601	203
1982	179	106	205	198	281	305	739	514	454	601	203
1983	231	136	264	255	362	392	952	662	585	774	262
1984	258	152	294	285	404	438	1063	739	653	864	292
1985	99	58	113	109	154	168	407	283	250	330	112
1986	215	127	246	238	337	366	887	617	545	721	244

Продолжение таблицы П.2

Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с по вариантам										
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1987	179	106	205	198	281	305	739	514	454	601	203
1988	181	107	207	201	284	309	748	521	460	608	206
1989	271	160	310	300	425	461	1118	778	687	909	307
1990	307	181	351	340	481	522	1266	881	778	1029	348
1991	291	172	333	322	456	495	1201	836	738	976	330
1992	264	156	302	293	414	450	1090	759	670	886	300
1993	356	210	407	394	558	606	1469	1022	903	1194	404
1994	437	257	499	484	684	743	1802	1254	1108	1464	495
1995	67	40	77	74	105	114	277	193	170	225	76
1996	204	120	233	226	319	347	841	585	517	683	231
1997	175	103	200	193	274	297	721	502	443	586	198
1998	249	147	284	275	390	423	1026	714	630	834	282
1999	338	199	387	374	530	575	1395	971	858	1134	384

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Ординаты кривых обеспеченности трехпараметрического  
гамма-распределения при  $C_s=2C_v$

P, %	Коэффициент изменчивости $C_v$								
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5
0,01	1,42	2,52	3,98	5,81	7,98	9,21	11,8	14,7	16,4
0,05	1,36	2,29	3,48	4,95	6,66	7,60	9,65	11,9	13,1
0,1	1,34	2,19	3,27	4,56	6,08	6,91	8,65	10,6	11,6
0,5	1,28	1,94	2,74	3,68	4,74	5,30	6,50	7,80	8,42
1	1,25	1,82	2,51	3,29	4,15	4,60	5,53	6,55	7,08
5	1,17	1,54	1,94	2,36	2,78	3,00	3,40	3,80	3,96
10	1,13	1,40	1,67	1,94	2,19	2,30	2,50	2,64	2,70
20	1,08	1,24	1,38	1,50	1,58	1,61	1,63	1,61	1,59
30	1,05	1,13	1,19	1,22	1,22	1,20	1,14	1,08	1,04
50	0,997	0,970	0,918	0,846	0,748	0,693	0,580	0,460	0,405
60	0,972	0,898	0,803	0,692	0,568	0,511	0,390	0,283	0,234
70	0,945	0,823	0,691	0,552	0,424	0,357	0,250	0,155	0,120
80	0,915	0,745	0,574	0,419	0,280	0,223	0,130	0,065	0,046
90	0,874	0,640	0,436	0,272	0,154	0,105	0,049	0,016	0,009
95	0,842	0,565	0,342	0,181	0,082	0,051	0,016	0,004	0,002
99	0,782	0,436	0,206	0,076	0,019	0,010	0,002	0,0002	0,00008

Ординаты кривых обеспеченности трехпараметрического  
гамма-распределения при  $C_s=3C_v$

P, %	Коэффициент изменчивости $C_v$											
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0
0,01	1,46	2,83	4,94	7,70	11,0	12,8	16,8	21,2	23,5	28,4	33,7	36,5
0,05	1,39	2,49	4,09	6,08	8,40	9,65	12,4	15,2	16,8	19,9	23,3	25,1
0,1	1,36	2,35	3,74	5,44	7,37	8,41	10,6	13,0	14,2	16,7	19,4	20,8
0,5	1,28	2,03	2,97	4,06	5,24	5,84	7,1	8,41	9,07	10,4	11,8	12,4
1	1,25	1,90	2,66	3,50	4,41	4,87	5,79	6,74	7,21	8,14	9,07	9,53
5	1,17	1,55	1,95	2,34	2,70	2,88	3,22	3,52	3,66	3,92	4,15	4,26
10	1,13	1,40	1,65	1,87	2,06	2,15	2,30	2,42	2,47	2,55	2,60	2,62
20	1,08	1,23	1,34	1,42	1,47	1,49	1,50	1,49	1,48	1,45	1,40	1,37
30	1,05	1,12	1,15	1,16	1,14	1,13	1,08	1,03	0,997	0,929	0,855	0,818
50	0,997	0,959	0,898	0,823	0,741	0,699	0,614	0,531	0,491	0,415	0,345	0,313
60	0,972	0,890	0,794	0,695	0,597	0,549	0,459	0,377	0,339	0,271	0,212	0,186
70	0,945	0,822	0,696	0,578	0,471	0,422	0,333	0,257	0,224	0,166	0,121	0,102
80	0,915	0,748	0,596	0,465	0,354	0,306	0,224	0,160	0,133	0,090	0,059	0,047
90	0,876	0,656	0,479	0,341	0,235	0,193	0,126	0,078	0,061	0,035	0,019	0,014
95	0,844	0,588	0,400	0,263	0,166	0,129	0,076	0,042	0,030	0,015	0,007	0,004
99	0,786	0,484	0,283	0,158	0,083	0,058	0,027	0,011	0,007	0,002	0,001	0,0004

# ГИДРОЛОГИЯ

## *Методические рекомендации*

Составители: **Чебанова** Елена Фёдоровна,  
**Приходько** Игорь Александрович

Подписано в печать 00.00. 2017. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ .

Усл. печ. л. – 4,0. Уч.-изд. л. – 3,1

Тираж 100 экз. Заказ № .

Типография Кубанского государственного  
аграрного университета. 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13