

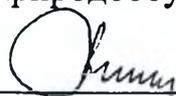
Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет»

Факультет инженерных систем и экологии

Кафедра природообустройства

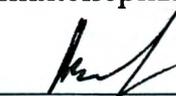
СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой  
природообустройства

 О.П.Мешик  
« 28 » 12 2022 г.

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета  
инженерных систем и экологии

 А.А.Волчек  
« 22 » 12 2022 г.

**ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
«ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА»**

для специальности:  
1-74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство»

Составители: Волчек А.А., д.г.н., профессор  
Зубрицкая Т.Е., старший преподаватель

Рассмотрено и утверждено на заседании Научно-методического совета  
университета 29.12.2022 г., протокол № 3

пр. № УМК 22/23 - 105

## Пояснительная записка

### *Актуальность изучения дисциплины*

Гидрологические исследования и гидрологические наблюдения являются важнейшим этапом изысканий при проектировании, а гидрологические и водохозяйственные расчеты – обязательной частью проекта любого гидротехнического сооружения, гидромелиоративной системы, включая дороги, они имеют большое значение при решении проблемы рационального и комплексного использования водных ресурсов.

*Цель преподавания дисциплины:* дать студентам необходимые знания о факторах и закономерностях формирования речного стока; режимах рек, озер, болот; способах и технических средствах измерения и определения основных гидрологических характеристик водотоков и водоёмов; теоретических основах и методах инженерных гидрологических расчетов, научить их применению этих методов при проектировании и эксплуатации водохозяйственных объектов, анализу и оценке получаемых результатов.

### *Задачи изучения дисциплины:*

- получить четкое представление о закономерностях формирования речного стока, питания и водном режиме рек, озер и болот, водной эрозии и русловых процессах;
- изучить способы и приборы, применяемые при гидрометрических измерениях на реках и учете воды на гидромелиоративных системах;
- овладеть приемами и способами получения, обработки, анализа и оценки достоверности материалов гидрометрических измерений и гидрологической информации;
- привить навыки решения практических задач по регулированию речного стока водохранилищами.

Электронный учебно-методический комплекс (ЭУМК) объединяет структурные элементы учебно-методического обеспечения образовательного процесса, и представляет собой сборник материалов теоретического и практического характера для организации работы студентов специальности 1-74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство» дневной формы получения образования по изучению дисциплины «Инженерная гидрология и регулирование стока».

ЭУМК разработан на основании Положения об учебно-методическом комплексе на уровне высшего образования, утвержденного Постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 26 июля 2011 г., № 167, и предназначен для реализации требований учебной программы по учебной дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока» для специальности -74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство». ЭУМК разработан в полном соответствии с утвержденной учебной программой по учебной дисциплине компонента учреждения высшего образования «Инженерная гидрология и регулирование стока».

*Цели УМК:*

- обеспечение качественного методического сопровождения процесса обучения;
- организация эффективной самостоятельной работы студентов.

Содержание и объем ЭУМК полностью соответствуют образовательному стандарту высшего образования специальности 1-74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство», а также учебно-программной документации образовательных программ высшего образования. Материал представлен на требуемом методическом уровне и адаптирован к современным образовательным технологиям.

*Структура учебно-методического комплекса по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока»*

**Теоретический раздел** ЭУМК содержит материалы для теоретического изучения учебной дисциплины и представлен курсом лекций, составленным профессором, д.г.н. Волчком А.А., старшим преподавателем Зубрицкой Т.Е.

**Практический раздел** ЭУМК содержит в электронном виде материалы для проведения практических и лабораторных занятий на протяжении одного семестра.

**Раздел контроля знаний** ЭУМК содержит перечень экзаменационных вопросов для итоговой аттестации.

**Вспомогательный раздел** включает учебную программу учреждения высшего образования по учебной дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока» и список литературы по дисциплине.

*Рекомендации по организации работы с УМК:*

- лекции проводятся с использованием представленных в ЭУМК теоретических материалов; при подготовке к практическим и лабораторным занятиям и экзамену, студенты могут использовать конспект лекций;
- практические и лабораторные занятия проводятся с использованием представленных в УМК методических материалов;
- экзамен проводится с использованием комплекта экзаменационных билетов, составленных из вопросов, приведенных в разделе контроля знаний.

ЭУМК способствует успешному усвоению студентами учебного материала, дает возможность планировать и осуществлять самостоятельную работу студентов, обеспечивает рациональное распределение учебного времени по темам учебной дисциплины и совершенствование методики проведения занятий.

## ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕРИАЛОВ В КОМПЛЕКСЕ

### 1 Теоретический раздел

Конспект лекций по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока»

Лекция 1 Вводная лекция

Лекция 2 Уровни воды. Глубины воды. Скорости течения

Лекция 3 Расходы воды

Лекция 4 Годовой сток при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений

Лекция 5 Применение методов математической статистики в гидрологических расчетах

Лекция 6 Внутригодовое распределение стока

Лекция 7 Максимальные расходы воды весеннего половодья и дождевых паводков

Лекция 8 Климатические факторы стока

Лекция 9 Минимальные расходы воды. Речные наносы, их образование

Лекция 10 Режим речного стока

Лекция 11 Виды регулирования стока

Лекция 12 Водохранилища. Назначения водохранилищ, их классификация

Лекция 13 Потери воды из водохранилища. Заиление водохранилищ

Лекция 14 Общая методика расчета водохранилищ. Сезонно-годовое регулирование стока

Лекция 15 Многолетнее регулирование стока

Лекция 16 Регулирование паводочного стока. Компенсирующее и каскадное регулирование стока

### 2 Практический раздел

Материалы для проведения практических занятий

Материалы для проведения лабораторных занятий

### 3 Раздел контроля знаний

Перечень вопросов выносимых на экзамен по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока»

### 4 Вспомогательный раздел

Учебная программа по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока» для специальности - 74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство»

**1 Теоретический раздел**  
**Конспект лекций по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока»**

## Лекция 1 Вводная лекция.

### Предмет гидрология, связь с другими науками

Гидрология (буквально - наука о воде) наука, изучающая природные воды, их взаимодействие с атмосферой и литосферой, а также явления и процессы, протекающие в водах (испарение, замерзание и т. п.).

#### Объект и предмет науки

*Объектом* изучения гидрологии являются водные объекты: океаны, моря, реки, озера и водохранилища, болота и скопления влаги в виде снежного покрова, ледников, почвенных и подземных вод и их гидрологические процессы.

Предметом науки являются закономерности распределения водных объектов и гидрологических процессов

Основное содержание гидрологических исследований в зависимости от их направления - либо определение географических характеристик водных объектов (их распределения по территории, размеров, общих описаний), либо выяснение физических закономерностей взаимодействия воды с окружающей средой (законы перемещения водных масс, испарения воды, таяния снега и ледяного покрова, воздействия воды на речное ложе и пр.). Таким образом, всестороннее изучение гидрологических процессов должно предусматривать, с одной стороны, исследование вод как элемента географического ландшафта, а с другой - установление физических закономерностей, которым подчиняются гидрологические процессы.

#### Задачи гидрологии

1. изучение закономерностей распределения водных объектов
2. выявление механизмов гидрологических процессов
3. анализ их специфики в различных природных условиях
4. создание и использование методов расчета и прогноза гидрологических процессов
5. обоснование проектов безопасного водопользования

Воды поверхности Земли (океанов, морей, рек, озер, болот, ледников), ее воздушной оболочки (атмосферы) и находящиеся в земной коре тесно связаны между собой, поэтому ряд вопросов, относящихся к деятельности воды на земном шаре, одновременно рассматривается гидрологией, метеорологией, геологией, почвоведением, геоморфологией, географией и другими науками, изучающими атмосферу и литосферу.

Так, например, общими для гидрологии и метеорологии являются вопросы образования, выпадения и распределения по земной поверхности атмосферных осадков, испарения воды с поверхности рек, озер и водохранилищ, испарения влаги с почвы и растительного покрова. Общими вопросами для гидрологии, геоморфологии и почвоведения являются процессы размыва (эрозии) и отложения (аккумуляции) продуктов разрушения горных пород, совершающиеся на земной поверхности.

В гидрологических исследованиях широко используются выводы физики, гидравлики и гидродинамики.

Так как процессы, совершающиеся в морях и океанах, существенно отличаются от процессов, происходящих в реках, озерах и болотах, что определяет и различие в методах их исследований.

Гидрология подразделяется на два больших раздела: гидрология суши, предметом изучения которой являются все водные объекты, расположенные в пределах суши, и гидрология моря (океанология).

В зависимости от объектов исследования можно различать:

- 1) гидрологию рек;
- 2) гидрологию озер;
- 3) гидрологию болот;
- 4) гидрологию подземных вод;
- 5) гидрологию ледников.

В зависимости от целей и методов изучения водных объектов, а также возникающих задач по использованию водных ресурсов в гидрологии суши выделяют научные дисциплины:

1) Гидрометрия, является частью гидрологии, в которой рассматриваются методы измерений и наблюдений, ведущихся с целью изучения гидрологического режима вод. Например методы измерений (и обработки) высоты уровней воды, расходов воды и наносов, скорости течения, толщины льда и т. д.

2) Гидрография, которая занимается изучением и описанием конкретных водных объектов, а также выявлением закономерностей географического распространения вод и особенностей их морфологии, режима, хозяйственного значения и использования.

3) Инженерную гидрологию (гидрологические расчеты), задачей которой является разработка методов установления характеристик

гидрологического режима водных объектов, необходимых для проектирования гидротехнических сооружений и планирования водохозяйственных мероприятий.

4) Гидрологические прогнозы, где рассматриваются методы составления характеристик гидрологических явлений на предстоящий период времени. Гидрологические прогнозы необходимы для различных отраслей народного хозяйства и, в частности, они нужны при эксплуатации гидротехнических сооружений и регулировании стока.

Помимо деления по объектам исследования, в гидрологии суши следует различать гидрометрию, гидрографию, общую гидрологию, инженерную гидрологию, динамику вод суши, русловые процессы, физику вод суши (гидрофизику) и химию вод суши (гидрохимию).

### **Основные этапы развития гидрологической науки.**

Первые сведения о гидрологии появились около 6000 лет назад, в Древнем Египте. В то время, египетские жрецы вели простейшие гидрологические наблюдения - отмечали на скалах уровни воды в периоды ежегодных разливов Нила. Позднее в Древнем Египте была создана целая сеть (около 30) „гидрологических" постов на Нижнем Ниле, так называемых ниломеров, где отмечали высоту подъема половодья.

По высоте уровня воды во время половодья Нила жрецы определяли будущий урожай и заблаговременно назначали налоги.

Однако понадобилось несколько тысячелетий для того, чтобы гидрология, превратилась в самостоятельную научную дисциплину.

Важным рубежом в истории развития гидрологии стал конец 17 в. Французский ученый П. Перро, а после него Э. Мариотт, измерив величину осадков и стока в бассейне Верхней Сены, установили количественные соотношения главных элементов водного баланса речного бассейна - осадков и стока. В этот же период английский астроном Э. Галлей на основании опытов по измерению испарения показал на примере Средиземного моря, что испарение с поверхности моря значительно превышает приток речных вод в него, и тем самым „замкнул" схему круговорота воды на земном шаре.

Измерения, расчеты и эксперименты Перро, Мариотта и Галлея, выполненные 300 лет назад, заложили основу для развития научной гидрологии.

Первая книга, с названием „Гидрология", появились в конце 17 в.: в 1694 г. во Франкфурте-на-Майне вышла книга Э. Мельхиора под названием

„Гидрология в трех частях“, содержащая описание целебных минеральных источников Висбадена.

В русской литературе термин „гидрология“, появился, лишь во второй половине 18 столетия: в статье Пера Варгентина „О натуральной истории вообще“ (1762 г.) упоминается о „знании воды, то есть гидрологии“.

В конце 19 столетия гидрологию еще рассматривали как часть физической географии, иногда ее относили к гидротехнике или гидравлике. С основами гидрологии студенты знакомились из курсов климатологии, мелиорации внутренних водных путей и т. п. И лишь в начале 20 в. определилось содержание гидрологии как самостоятельной науки, в некоторых университетах и технических учебных заведениях Германии, Франции, России, США стали читать специальные курсы гидрологии, появились первые учебные пособия по этой дисциплине.

В России впервые курс гидрологии суши вел в Петербургском политехническом институте проф. С. П. Максимов в 1914 г.

Один из основоположников советской гидрологии профессор В. Г. Глушков считал С. П. Максимова своим учителем.

Интенсивное развитие гидрологической науки началось примерно с 30-х годов 20-го века, когда знание гидрологических закономерностей стало особенно необходимым вследствие быстрого развития гидроэнергетики и ирригации и связанного с этим широкого использования рек, строительства крупных водохранилищ и каналов.

### **Круговорот воды в природе.**

Благодаря круговороту воды в природе реки, моря, озера не обмелеют.

Вода находится на земном шаре в постоянном движении. Под действием солнечного тепла с поверхностей морей и океанов ежегодно испаряется громадное количество воды. Пары воды, поднявшись в атмосферу, переносятся воздушными течениями за сотни и тысячи километров. При определенных условиях они сгущаются (конденсируются), образуют облака и возвращаются на землю в виде осадков.

Осадки, выпавшие на материки, частично испаряются с поверхности суши и снова попадают в атмосферу, а частично стекают по рекам в моря и океаны. Сток воды в реки происходит двумя путями: поверхностным по склонам местности и подземным через поры грунта по водонепроницаемому слою. Часть воды поступает с суши в моря и океаны подземным путем, минуя реки.

Непрерывный процесс обмена влаги между океанами, атмосферой и сушей называется *круговоротом воды в природе*.

Различают несколько видов круговоротов воды в природе:

Малый, или океанический, круговорот – водяной пар, образовавшийся над поверхностью океана, сконденсируется и выпадает в виде осадков снова в океан.

Большой, или мировой, круговорот – водяной пар, образовавшийся над поверхностью океанов, переносится ветрами на материки, выпадает там, в виде атмосферных осадков и возвращается в океан в виде стока. В этом процессе изменяется качество воды: при испарении соленая морская вода превращается в пресную, а загрязненная – очищается.

Внутриконтинентальный круговорот – вода, которая испарилась над поверхностью суши, опять выпадает на сушу в виде атмосферных осадков.

### **Водные ресурсы земли**

Вода занимает 70 % поверхности земного шара. Она содержится в воздухе и в земле, образует океаны, моря, реки, озера. Без воды невозможно существование растений, животных, рыб и человека.

**Водные ресурсы** – Водные ресурсы – поверхностные и подземные воды, которые используются или могут быть использованы в хозяйственной и иной деятельности. К ним относятся природные воды и сточные, образующиеся в результате антропогенной деятельности.

**Природные водные ресурсы** сосредоточены в поверхностных и подземных водных объектах, атмосфере и почве.

### **Характеристика мировых запасов вод**

<b>Части гидросферы</b>	<b>Запасы воды, тыс.км<sup>3</sup></b>	<b>Запасы воды, %</b>	<b>Время возобновления</b>	<b>Использование для водопотребления</b>
Океан	1476000	94,32	3000 лет	не используются
Подземные воды	60000	3,83	5000 лет	питьевые цели
Ледники	30000	1,92	8000 лет	не используются
Озера/болота	290	0,02	7/5 лет	широкое использование/ не используются
Почвенная влага	16	0,001	1 год	потребление растениями
Атмосферная влага	14	0,0008	10 сут	не используются
Реки	2	0,0001	12 сут	широкое использование

Распределение и потребление воды по территории Земли и отдельным регионам неравномерно

### Распределение стран по запасам пресной воды в мире

<i>Страна</i>	<i>Ресурсы, км<sup>3</sup></i>	<i>На душу населения, тыс. м<sup>3</sup></i>
Бразилия	6950	43,0
<b>Россия</b>	<b>4500</b>	<b>30,5</b>
Канада	2900	98,5
Китай	2800	2,3
Индонезия	2530	12,2
США	2480	9,4
Бангладеш	2360	19,6
Индия	2085	2,2
Венесуэла	1320	60,3
...		
<b>Беларусь</b>	<b>84</b>	<b>6,1</b>

**Бразилия.** У Бразилии самый большой объем возобновляемых источников пресной воды, который составляет примерно 6950 км<sup>3</sup>. Пресная вода в Бразилии составляет приблизительно 15% мировых запасов пресной воды. Регион Амазонки в Бразилии содержит более 70% от общего объема пресной воды в Бразилии. Несмотря на наличие многочисленных источников пресной воды, один из самых густонаселенных регионов Бразилии, Сан-Паулу, сталкивается с серьезной засухой. Доступ к пресной воде для бедных районов в городских районах по-прежнему является проблемой в Бразилии.

**Россия.** К возобновляемым пресноводным водоемам России относятся реки, озера и искусственные водоемы. Озеро Байкал, самое большое и глубокое пресноводное озеро в мире, расположено в России. Однако объем озера постепенно сокращается из-за изменения климата. Байкал укрывает большую популяцию тюленей. Всего в России имеется 4500 кубических километров пресных водных ресурсов.

**США.** Объем возобновляемых источников пресной воды в США составляет примерно 3069 км<sup>3</sup>. Большая часть пресноводных ресурсов страны - это поверхностные воды. Примерно 77% пресной воды приходится на поверхностные воды и 23% - на подземные. Большинство пресноводных водоемов в Соединенных Штатах - озера. В США есть тысячи озер, в том числе всемирно известные Великие озера.

**Канада.** Объем возобновляемой пресной воды в Канаде составляет примерно 2902 км<sup>3</sup>. Большая часть пресной воды Канады находится в ее

разнообразной речной системе и озерах. Кроме того, пресная вода в основном находится под землей, в небольших прудах или в ледниках. Подземные воды в основном не возобновляемы. Пресная вода в канадских озерах обеспечивает питьевой водой более 8 миллионов человек и поддерживает четверть сельского хозяйства в стране.

**Китай** также занимает одно из лидирующих мест по объему возобновляемых источников пресной воды в мире. Он имеет приблизительно 2800 км<sup>3</sup> пресной воды. Озеро Поян является крупнейшим пресноводным озером в Китае. Реки Синь, Сю и Гань сливают свои воды в озеро. Объем озера постоянно колеблется в зависимости от сезонов года.

### **Водно-ресурсный потенциал Республики Беларусь**

Согласно Статьи 5 Водного Кодекса РБ поверхностные водные объекты классифицируются:

1. Поверхностные водные объекты подразделяются на:
  - 1.1. водотоки; 1.2. водоемы; 1.3. родники.
2. Водотоки подразделяются на:
  - 2.1. реки; 2.2. ручьи; 2.3. каналы.
3. Реки подразделяются на:
  - 3.1. большие, протяженностью свыше 500 километров (Березина, Горынь, Днепр, Западная Двина, Западный Буг, Неман, Припять, Сож);
  - 3.2. средние, протяженностью от 200 до 500 километров (Беседь, Виляя, Друть, Западная Березина, Ипуть, Остер, Птичь, Свислочь, Уборть, Щара, Ясельда);
  - 3.3. малые, протяженностью от 5 до 200 километров.
4. Водоемы подразделяются на:
  - 4.1. озера (естественные водоемы);
  - 4.2. водохранилища;
  - 4.3. пруды;
  - 4.4. пруды-копани;
  - 4.5. обводненные карьеры.

Территория Беларуси служит водоразделом для бассейнов Балтийского и Чёрного морей. Примерно 55% речного стока приходится на реки бассейна Чёрного моря и 45% – Балтийского.

Основным источником водных ресурсов Беларуси являются средние и крупные реки, вдоль которых концентрируется население и промышленность. Немаловажное значение имеют ресурсы малых рек. Благодаря рассредоточенности их по территории, во многих регионах они служат основным, а порой и единственным источником воды.

Главные речные системы страны: Днепр с Березиной и Сожем, Припять, Западная Двина, Неман и Западный Буг. Небольшие бассейны в Беларуси образуют Вилия и Ловать.

Основной объём местного речного стока (65 %) формируется в водосборах Западной Двины с Ловатью, Немана с Вилией и Припяти. Значительно меньше приходится на долю Днепра с Березиной и Сожем (31 %), Западный Буг даёт 4 %. Преобладающая часть транзитного стока поступает по Западной Двине (35 %) и Припяти (28 %).

#### **Бассейн Черного моря**

Водная система	Площадь, тыс.км <sup>2</sup>	Притоки
Днепр	63,7	Друть, Сож, Березина
Сож	21,7	Проня, Ипуть, Бесядь
Березина	24,5	Свислочь
Припять	50,9	Стырь, Птичь, Случь, Горынь, Пина, Ясельда

#### **Бассейн Балтийского моря**

Водная система	Площадь, тыс.км <sup>2</sup>	Притоки
Неман	34,6	Щара, Западная Березина
Вилия	10,9	
Западная Двина	33,2	Оболь, Улла, Дрисса, Дисна
Западный Буг	9,99	Мухавец, Лесная
Ловать	3,82	

На территории республики протекает десять крупных рек. Все они, кроме Березины, являются трансграничными. Всего на территории Беларуси 20,8 тыс. рек и ручьёв, суммарной длиной 90,6 тыс. км.

#### **10 крупнейших рек Беларуси**

Название	Длина, км	Название	Длина, км
Днепр	700 / 2174	Западная Двина	338 / 1020
Березина	561	Вилия	276 / 510
Припять	495 / 761	Западный Буг	169 / 772
Сож	451 / 648	Горынь	82 / 659
Неман	436 / 914	Ловать	47 / 536

В Беларуси около 10800 озер, более 9000 болот, 20800 рек и ручьев. Создано 160 водохранилищ, крупнейшее – Вилейское, которое по своим размерам (79,2 км<sup>2</sup>) сопоставимо с озером Нарочь.

## **Озера**

Большинство крупных озёр Белорусского Поозерья имеет ледниковое происхождение. Таких озёр около 1900. Их котловины образовались в результате выпахивания ложбин во время движения ледника или таяния погребённых линз льда.

Ложбинные озёра глубокие, небольшой площади и вытянуты с северо-запада на юго-восток.

## **Каналы**

**Водный канал** - искусственная водная артерия, предназначенная для сокращения водных маршрутов или для перенаправления потока воды.

Самый крупный и важный по хозяйственному значению - **Днепровско-Бугский** канал протяжённостью 196 км, соединяющий реки Пина и Мухавец. Канал используется для судоходства, а также для приёма воды из мелиоративных систем.

**Огинский канал** соединяет реку Щару с Ясельдой. Канал проходит через Выгонощанское озеро, его общая длина составляет 54 км. Долгое время использовался для лесосплава и перевозки зерна, а в XX ст. потерял своё транспортное значение.

Речные системы Немана и Вислы соединяет **Августовский канал**, большая часть которого расположена в Польше. Его общая длина 102 км, из них на территории Беларуси - 22 км. В последние годы канал восстановлен и используется в рекреационных целях.

**Березинский канал** соединяет Днепр с Западной Двиной. Длина канала - 162,1 км. Система способствовала вывозу сельхозпродукции и сырья, а также леса. Эксплуатировалась в XIX веке.

Во второй половине XX в. построена **Вилейско-Минская водная система**. Она соединяет реки Вилия и Свислочь, включает Вилейское и Заславское водохранилища, соединительный канал длиной более 60 км и каскад водохранилищ на реке Свислочь. Основное назначение водной системы - водообеспечение Минска.

## **Водоохранилища**

На территории Беларуси созданы искусственные водоёмы - водохранилища и пруды.

В настоящее время в Беларуси создано 160 водохранилищ, осуществляющих сезонное регулирование и имеющих объём свыше 1 млн м<sup>3</sup> каждое.

**Вилейское** водохранилище. Расположено в Вилейском районе в бассейне реки Вилия и входит в Вилейско - Минскую водную систему. Это крупный гидротехнический комплекс по переброске речного стока из бассейна Балтийского моря в центральную и далее в южную часть Беларуси, т.е. к бассейну Черного моря. Основное назначение водохранилища – регулирование стока и обводнение реки Свислочь, а также создание условий для активного отдыха: воднолыжным, гребным и парусным спортом.

**Заславское** водохранилище (Минское море) располагается в 10 км к северо-западу от Минска на территории курорта Ждановичи, входит в состав Вилейско-Минской водной системы. Это второй по величине искусственный водоём в Беларуси. Основное назначение - регулирование стока и обводнение реки Свислочь, водоснабжение Минска, создание условий для активного отдыха населения.

Помимо регулирования стока водохранилищами большое распространение получило **строительство прудов**. В настоящее время насчитывается более тысячи прудов различного назначения, объёмом более 600 млн.м<sup>3</sup>.

Территория Беларуси богата и разнообразными **минеральными водами**. Сейчас эксплуатируется около 70 месторождений разных по химическому составу минеральных вод. Общие запасы превышают 14 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

На территории республики имеются 224 скважины с минеральной водой, расположенные в районах размещения санаторно-курортных и лечебных учреждений и заводов (предприятий и цехов) по розливу воды. В эксплуатации находятся 130 скважин. Остальные работают периодически или временно законсервированы.

### **Реки и их формирование.**

Вода, поступающая на поверхность земли в виде осадков или выходящих подземных потоков, собирается в понижениях рельефа и, стекая под действием силы тяжести в направлении понижения местности, образует поверхностные водотоки.

Атмосферные осадки и источники грунтовой воды не сразу создают большие реки. Вода сначала собирается в отдельные струйки, затем в ручьи, а последние, постепенно соединяясь, образуют реки. Река принимает в себя

притоки и постепенно увеличивается вниз по течению. Начало многих рек лежит в болотных массивах. Нередки случаи, когда река начинается из озера. В этом случае река уже в начале может иметь весьма большие размеры.

Например, р. Нева, вытекающая из Ладожского озера крупным потоком, существенно не изменяется до самого устья. (река в России, протекающая по территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга, соединяющая Ладожское озеро с Невской губой Финского залива Балтийского моря. Расстояние от истока до устья Невы по прямой— 45 км. Нева— широкая и глубокая река. Средняя ширина 400—600 м. Самые широкие места (1000—1250 м). Средняя глубина 8—11 м; наибольшая глубина (24 м).

Поверхностные водотоки в зависимости от их величины и физико-географических условий, в которых они протекают, могут быть постоянно или периодически действующими. Система постоянно и временно действующих водотоков и озер образует **гидрографическую сеть** поверхности суши. К гидрографической сети не относятся многочисленные небольшие струйки воды, временно образующиеся в период таяния снега или выпадения жидких осадков, а также временные скопления воды, возникающие в небольших многочисленных понижениях местности.

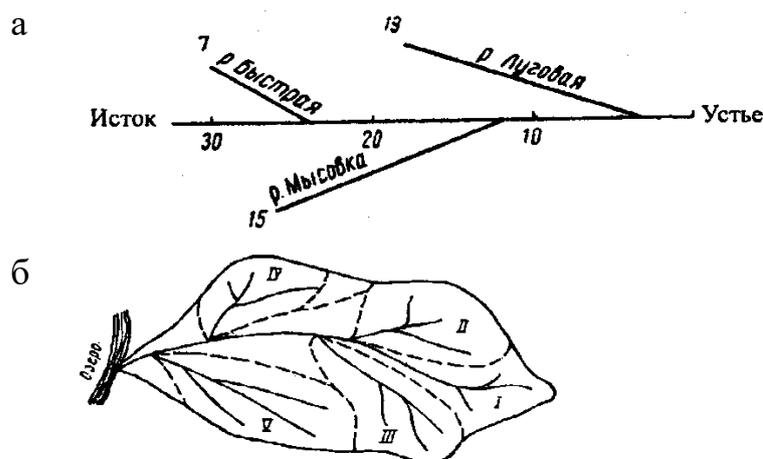


Рисунок. Речная система:

а – гидрографическая схема реки; б – бассейн реки

В строении гидрографической (русловой) сети можно выделить следующие основные звенья, последовательно сменяющиеся от верховьев вниз по течению: ложбины, лощины, суходолы, речные долины.

**Ложбина** – верхнее (по течению) звено гидрографической сети, представляет собой слабовыраженную, вытянутую впадину водно-эрозионного происхождения с пологими, обычно задернованными склонами и ровным, вогнутым, наклонным дном. Ложбина развивается обычно при площади

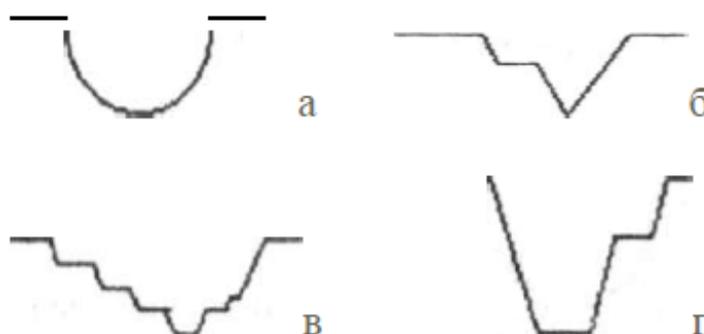
водосборов 10 – 15 га в слаборазчлененных районах и при 50 га – в сильнорасчлененных районах европейской территории России.

**Лощина** – следующее за ложбиной звено гидрографической сети, отличающееся от ложбины большей глубиной вреза, большей высотой и крутизной склонов и появлением форм донного и берегового размыва или ветвистого русла. Лощины отводят воду с площади от 10 – 15 га до 10 – 15 км<sup>2</sup> в слаборасчлененных районах и от 50 га до нескольких квадратных километров в сильно расчлененных районах.

**Суходол** – преддолинное нижнее звено гидрографической сети без постоянного водотока; характеризуется асимметрией склонов и наличием извилистого русла временного потока. В условиях сильно расчлененного рельефа суходолы развиваются при площади водосбора 10 – 15 км<sup>2</sup>, в слаборасчлененных – 20 – 25 км<sup>2</sup>.

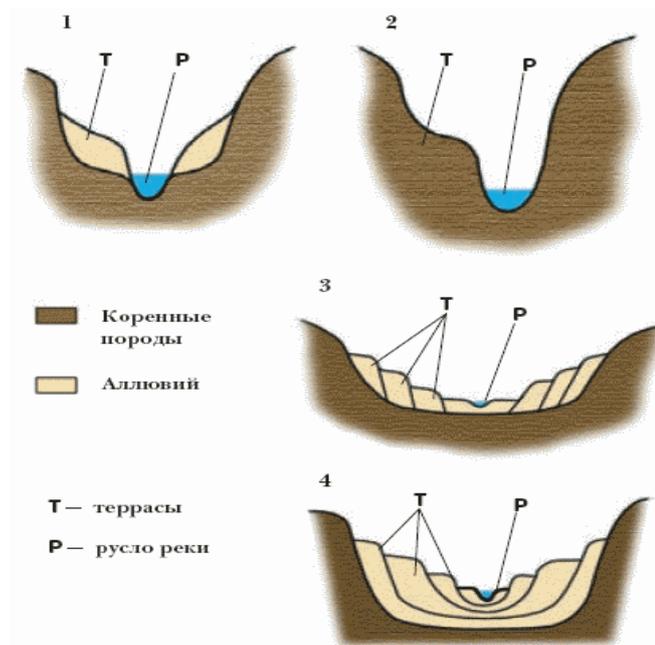
**Долина** – наиболее полно разработанное деятельностью воды звено гидрографической сети, характеризующееся большой протяженностью, измеряемой десятками, сотнями и тысячами километров и наличием постоянного потока (речные долины).

Реки обычно текут в вытянутых пониженных формах рельефа – долинах, наиболее пониженная часть рельефа которых называется руслом, а часть дна долины, заливаемая высокими речными водами, – поймой. Долина имеет ряд надпойменных террас (обычно 2-3).



Виды поперечных профилей речных долин: а – корытообразный (трог); б – V – образная щелевая; в – трапециевидная (террасированная); г – U – образная (каньон).

Речные террасы представляют собой горизонтальные или слабо наклоненные поверхности на склонах речных долин, ограниченные уступами. Образованы размывающей и аккумулятивной деятельностью реки и сложены обычно аллювием. По происхождению они делятся на вложенные и наложенные террасы; по слагаемому материалу – на аккумулятивные, цокольные и коренные.



Речные террасы: 1 – аккумулятивная; 2 – эрозионная; 3 – наложенная;  
4 – вложенная

**Речная система** – это совокупность всех рек, впадающих в рассматриваемую главную реку.

Речная система включает в себя одну главную реку и ряд притоков. Реки, непосредственно впадающие в главную реку, называются притоками 1 порядка. Реки, впадающие в притоки 1 порядка, называются притоками 2 порядка, и т.д.

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. Бассейн любого водного объекта состоит из поверхностного и подземного водосборов. Водосборы водных объектов отделяются друг от друга **водоразделами**, то есть линиями, проходящими по наивысшим точкам земной поверхности, расположенной между ними.

Водораздел: а) поверхностный; б) подземный. Они не всегда совпадают. В гидрологических расчетах за площадь водосбора часто принимают размер только поверхностного водосбора из-за отсутствия необходимых данных для определения подземного.

### Истоки и устья водотоков

Место начала реки называется **истоком**. Начало река может получить из ручьев и ключей, ледника, озера или болота. Когда река образуется от слияния двух рек, место слияния является началом этой реки, однако за исток ее следует принимать место начала более длинной из двух слившихся рек.

**Под устьем реки** подразумевается место впадения ее в другую реку, озеро, водохранилище. Если река впадает в реку, озеро или море двумя рукавами, за устье принимается устье более крупного рукава. При наличии дельты за устье принимается устье основного рукава.

В зависимости от очертаний в плане и характера происходящих процессов **устья рек** подразделяются на несколько **типов**:

I – *однорукавное* (притоки многих рек разного порядка). Характерно для рек зоны пониженной мутности, впадающих в море, озеро, водохранилище или другую реку, образующих самостоятельное устье, в том числе почти для всех рек в пределах Беларуси;

II – *воронкообразное, или эстуарий* (Обь, Енисей, Хатанга, Мезень, Южный Буг, Днепр, Темза, Св. Лаврентия). Эстуарии – это сравнительно узкие и глубокие заливы (губы) воронкообразной формы. Часто они представляют собой нижние участки долин, затопленные морскими водами при опускании суши. Накоплению наносов в эстуарии препятствуют приливо-отливные и береговые течения моря;

III – *островное* (Амазонка, Дон, Печора, Северная Двина, Индигирка, Яна, Колыма, Нева). Это одна из разновидностей дельт, характеризующаяся наличием островов, часто значительных по площади. Например, площадь дельты Амазонки с островами составляет 105 000 км<sup>2</sup>;

IV – *лопастное* (Кура, Урал). Лопастные дельты образуются в устьях рек, впадающих в море длинными и узкими рукавами, несущими большое количество наносов;

V – *многорукавное, или ветвящееся* (Миссисипи, Ганг и Брахмапутра, Хуанхэ, Волга, Терек, Амударья, Лена). К этому типу относятся крупнейшие дельты мира – в устьях Ганга и Брахмапутры (105 600 км<sup>2</sup>), в России – в устьях Лены (32 000 км<sup>2</sup>), Волги (11 000 км<sup>2</sup>), Терека (8900 км<sup>2</sup>). При впадении в море или озеро река часто отлагает значительное количество наносов и в этом случае создает многорукавное устье, называемое **дельтой**. Чем меньше несет река наносов, тем слабее выражены дельтовые формы. Приливы, отливы и морские течения затрудняют образование дельт.

VI – *блокированное, или лиманное* (Кубань, Камчатка, Днестр, Западная Двина, Неман, Западный Буг). Блокированные дельты образуются при впадении реки в лиман или лагуну (бухту) – участок моря, отделенный от моря косой.

Таким образом, устья III–VI типов представляют собой различные дельтовые образования.

## Общие сведения о структуре речного русла

**Русло реки** – это часть дна долины, по которой осуществляется сток воды. Русла равнинных рек извилистые (меандрирующие), характеризуются наличием подвижных скоплений наносов, формирующих русловые образования. Плавный изгиб русла реки, называется меандр. Меандрируя, реки постепенно увеличивают свои излучины, подмывая вогнутый берег и откладывая переносимый материал у противоположного выпуклого берега. Постепенно днище долины расширяется и формируется пойма. На определенной стадии развития река может спрямить свое русло. Отделившийся от реки меандр превращается в старицу – замкнутый водоем – озеро, имеющую продолговатую, извилистую или подковообразную форму.

Русла больших рек имеют ширину от нескольких метров до десятков километров (например, в низовьях Оби, Лены, Амазонки), при этом возрастание глубины русла по мере увеличения размеров реки происходит медленнее, чем увеличение ширины. По длине русла глубокие места (плесы) чередуются с мелкими (перекатами).

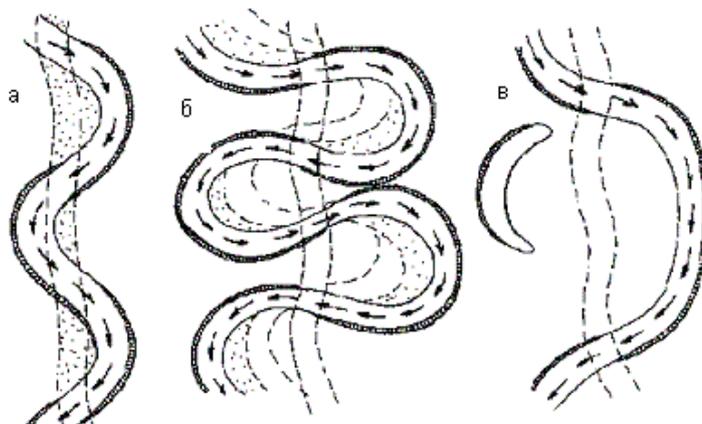
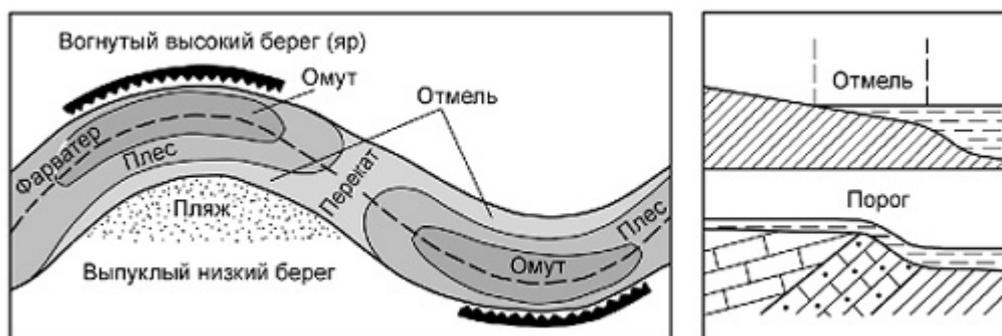


Схема последовательного смещения речных меандр по мере их развития:

а – начальная стадия; б – рост и смещение меандра; в – образование старицы

В руслах чередуются более глубокие места – плёсы и мелководные участки – перекаты. Линия наибольших глубин русла образует фарватер, а линия наибольших скоростей течения называется стрежнем.



**Пойма** – часть речной долины, затопляемая в половодье или во время паводков. Ширина пойм равнинных рек обычно составляет порядка от ширины русла до нескольких десятков ширин русла, иногда достигает 40 км.

### **Морфологические элементы и морфометрические характеристики русла**

Рассмотрим основные *морфологические элементы русла*

**Остров** – часть поймы (ложе долины), ограниченная рукавами или протоками реки, устойчивая и закреплённая растительностью.

**Осередок** – подводное или надводное отложение наносов, не примыкающее к берегам.

**Протока** – ответвление реки от основного русла с меньшими размерами. Некоторые протоки могут иметь большую ширину и глубину по сравнению с руслом, но скорость течения при низких уровнях в них всегда значительно меньше;

**Рукав** – часть русла реки, отделённая островом.

**Залив (затон)** – глубоко вдающийся в берег залив в реке.

**Староречье** (старица) – отчленившийся участок ранее существовавшего русла реки.

**Останец** – островное возвышение между основным руслом и староречьем, устойчивое и закреплённое растительностью.

**Пережат** – более или менее устойчивое образование в русле в виде поперечного вала из наносов, пресекающего русло под некоторым углом.

Пережат – мелководный участок русла реки. Обычно пережат сложен рыхлыми отложениями (аллювием), пересекает русло и имеет вид вала: с пологим скатом, обращенным против течения, или с крутым скатом, обращенным по течению.

Пережат образуется в результате неравномерного размыва русла водным потоком и отложения наносов. Пережат часто встречается в местах расширения русла реки, близ устьев притоков. Над пережатами поток теряет свою энергию.

**Плёт** – мелководный участок русла реки, расположенный между мелководными участками русла реки (пережатами). Плёт обычно образуется там, где в половодье наблюдается местное увеличение скорости течения реки и интенсивно размывается её дно (например, в изогнутых участках русла, в сужениях речной долины). Обычно плёт образуется в русле меандрирующей реки в вершине излучины у вогнутого берега. Обычно по течению меандрирующей реки плёсы регулярно чередуются с пережатами.

**Приплесок** – узкая полоса (песчаная, галечная) по береговому склону, заливаемая даже при небольших подъемах уровня воды. Наиболее распространены приплески на горных реках.

**Отмель** – мелководное место в русле, обсыхающее при очень низкой воде.

**Коса** – узкая намывная полоса, причлененная одним концом к берегу, а другим выступающая в сторону реки.

**Пляж** – широкая ровная береговая полоса, примыкающая к руслу, сложенная речными наносами (чаще песчаными).

**Побочень** – отмель значительной ширины, примыкающая своей возвышенной частью к вогнутому берегу.

Размеры и формы русла, как и речной долины, изменяются по длине реки в зависимости от водности, строения долины, характера пород и грунтов, которыми оно сложено.

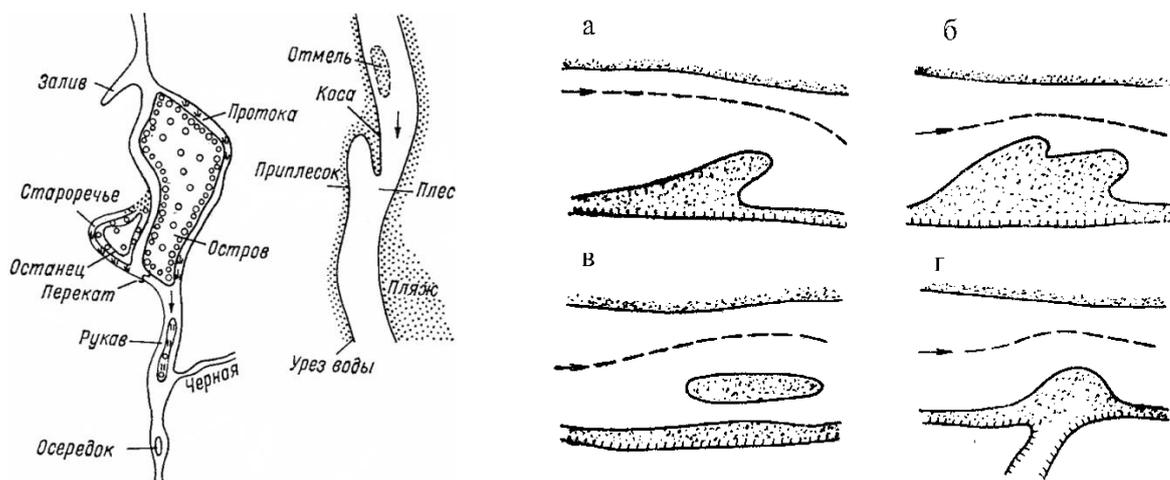


Рисунок Формы русловых образований. а – коса; б – побочень; в – осередок; г – высыпка

Основными **морфометрическими характеристиками поперечного сечения** речного русла являются площадь поперечного сечения, ширина и глубина русла, смоченный периметр и гидравлический радиус.

**Площадь поперечного сечения** ( $F$ , км<sup>2</sup>) – площадь, ограниченная профилем русла и уровнем воды. Для определения площади бассейна реки применяется ряд методов: измерение планиметром, определение с помощью геодезических таблиц, измерение палеткой, графическим методом.

**Ширина русла**  $B$  (м) – расстояние между урезами русла по линии, перпендикулярной потоку.

$$B = L_n - L_1$$

где  $L_n$  - расстояние от постоянного начала до уреза дальнего берега;  $L_1$  - расстояние до уреза ближнего берега

**Глубина русла  $h$  (м)** – расстояние по вертикали от поверхности воды до дна. Различают максимальную глубину  $h_{\max}$  и среднюю глубину  $h_{\text{ср}}$  – частное от деления площади поперечного сечения на ширину русла:

$$h_{\text{ср}} = F/B.$$

**Смоченный периметр  $\chi$  (м)** – длина линии дна реки на профиле, заключенная между урезами воды.

$$\chi = \sqrt{b_1^2 + h_1^2} + \sqrt{b_2^2 + (h_2 - h_1)^2} + \sqrt{b_3^2 + (h_3 - h_2)^2} + \dots + \sqrt{b_{n+1}^2 + h_n^2}$$

где  $h_1, h_2, \dots, h_n$  — рабочая глубина на вертикалях, м;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  — расстояние между вертикалями, м.

**Гидравлический радиус  $R$  (м)** – частное от деления площади поперечного сечения на длину смоченного периметра:

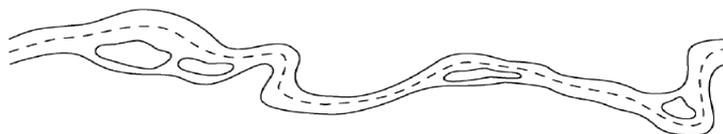
$$R = F/\chi.$$

Наличие в русле реки различных углублений дна, выступов, неровностей и других особенностей влияет на характер и интенсивность русловых процессов.

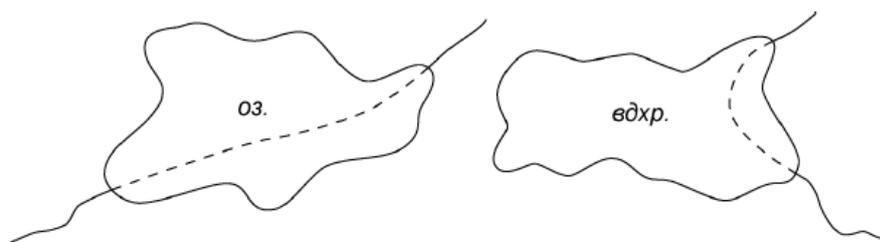
**Длина реки** измеряется расстоянием от истока до устья вдоль *фарватера* – линии максимальных глубин.

Измерение длины водотоков проводится по топографическим картам крупного масштаба (1:10 000 — 1:100 000). В тех случаях, когда река протекает через озеро или водохранилище, сохраняя при этом своё название, в длину реки включается и длина озера или водохранилища между точками впадения и истечения реки по средней линии водоема или по условной линии, совпадающей с положением прежнего русла реки до создания водохранилища.

Если река разделяется на протоки, средняя линия проводится по более многоводному протоку, который устанавливается по изображению на топографической карте

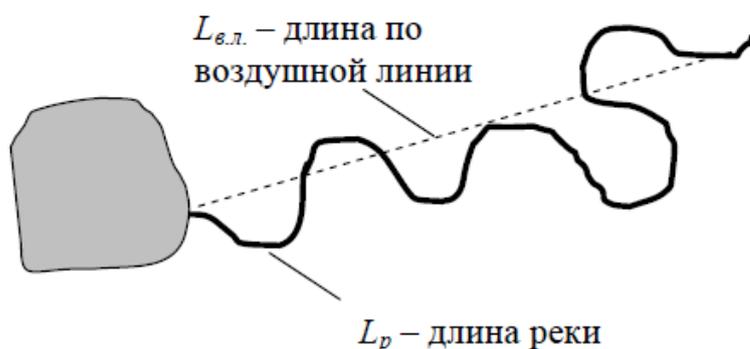


В тех случаях, когда река протекает через озеро или водохранилище, сохраняя при этом свое название, в длину реки включается и длина озера или водохранилища между точками впадения и выхода реки по средней линии водоема или по условной линии, примерно совпадающей с положением прежнего русла реки до создания водохранилища.



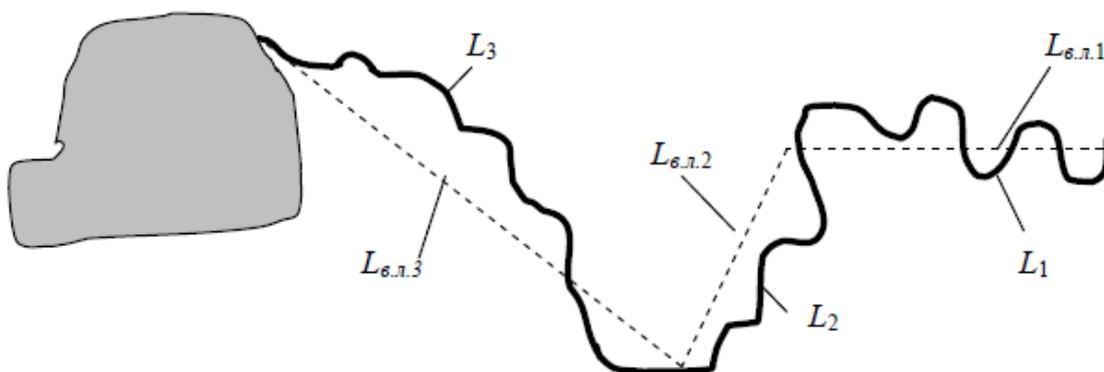
**Извилистость** реки и ее *разветвленность* оценивается соответствующими коэффициентами:

$$k_{и} = \frac{L_p}{L_{в.л.}} - \text{коэффициент извилистости}$$



При большой протяженности реки:  $k_{и} = \frac{\sum k_{иi} L_{в.л.i}}{\sum L_{в.л.i}}$

где  $L_i$  – длина участка реки по воздушной линии, в пределах которого сохраняется общее направление течения.



где  $L_i$  – длина участка реки, в пределах которого сохраняется общее направление течения.

**Разветвленность** реки оценивается коэффициентом разветвленности:

При большой протяженности реки:  $k_p = \frac{L_{рук}}{L_{гл.русла}}$

где  $L_{рук}$  – длина рукавов реки,  $L_{гл.русла}$  – длина главного русла.

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 2 Уровни воды. Глубины воды. Скорости течения.**

Наблюдения при высоких водах проводятся для проектирования мостовых переходов через крупные реки и дополняют ранее проведенные морфометрические обследования.

Во время высоких вод проводятся следующие гидрометрические работы:

- определяются скорости течения путем непосредственных измерений;
- измеряются уровни воды; (гидрометрической штангой, мерной рейкой; лотом; эхолотом).
- устанавливаются направления струй и траекторий движения судов, плотов и льдин.

Для указанных работ необходимо до наступления половодья (паводка) провести соответствующую подготовку: разбить гидростворы, соорудить водомерные посты, построить наблюдательную вышку, оборудовать плавучие средства.

### **1. Разбивка гидрометрических створов.**

**Створ гидрометрический (гидроствор)** — специально выбранный поперечник водотока, в котором измеряется расход воды и производятся другие виды гидрометрических работ.

Входит в состав гидрологического поста наряду с его устройствами для измерения уровней, температуры воды и других элементов водного режима реки (канала). К участку гидроствора относится часть реки, непосредственно примыкающая к гидроствору на удалении двух-трех ширин русла сверху и снизу по течению.

Гидростворы намечаются перпендикулярно течению воды.

Число гидростворов зависит от характера реки на участке мостового перехода. Если русло делится на рукава, либо ширина поймы резко меняется или на ней имеются протоки и озера, то разбиваются несколько гидростворов. Обычно два-три, чтобы проследить изменение скоростей течения не только по ширине, но и вдоль потока. В простых ситуационных условиях (прямой участок реки, однообразная пойма) допустимо ограничиться одним гидроствором. Когда назначается несколько гидростворов, то один из них принимается за главный. На нем производится большая часть измерений. Желательно, чтобы он совпал с осью будущего мостового перехода.

Гидрометрические створы разбиваются на всю ширину разлива реки с запасом по высоте над уровнем ГВВ на 2 м. Затем строят его профиль. По профилю намечаются вертикали для измерения скоростей течения вертушками. Число вертикалей зависит от их ширины. От 5 до 14 вертикалей при ширине створа от 100 до 1000 м. На пойме должно быть не меньше 4 вертикалей на каждые 1000 м ширины разлива.

Гидростворы закрепляются на местности высокими вехами, по две вехи на каждом берегу.

Требования к участку гидроствора, обеспечивающие нормальные условия измерений:

- расположение гидроствора на плесовых участках реки;
- отсутствие поймы с протоками и рукавами;
- отсутствие естественных или искусственных преград;
- отсутствие водной растительности в самом гидростворе, а также выше и ниже его на расстоянии до 30 м;
- мертвые пространства должны иметь четкие границы и составлять не более 10 % от площади водного сечения;
- при ледоставе должен отсутствовать многоярусный ледяной покров и незамерзающие полыньи;
- средняя скорость течения должна быть не менее 0,08 и не более 5 м/с;
- при измерении расхода воды вблизи моста участок гидроствора должен быть расположен выше, но в случаях частых скоплений льда и заломов леса — ниже моста (на удалении не менее 3—5 ширин русла в обоих случаях).

## **2. Приборы для измерения уровней**

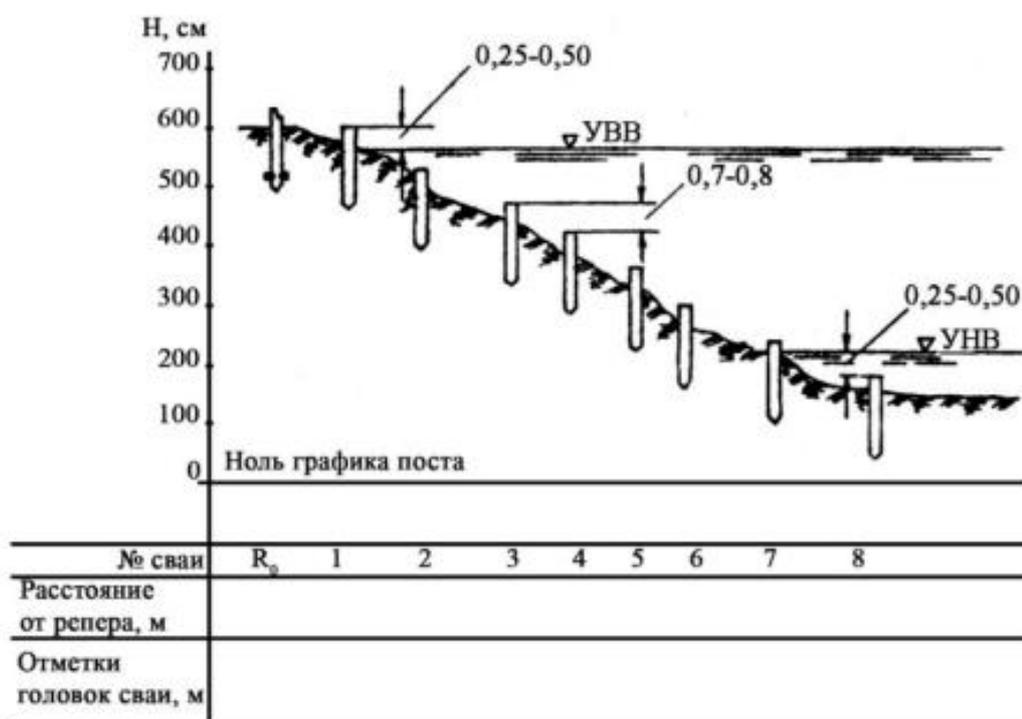
По конструкции водомерных устройств посты подразделяются на 1) простые(речные, свайные, смешанные); 2) передаточные; 3) самопишущие; 4) дистанционные, регистрирующие уровень непрерывно или определенные сроки и передающие информацию на значительные расстояния от места измерения.

Простые водомерные посты в настоящее время широко распространены вследствие несложности устройства сравнительно невысокой стоимости. Отсчеты уровня на них производятся при посещении поста наблюдателем. Эти посты дают достаточно точные сведения о режиме уровня. если на водном объекте, где установлен пост, нет ярко выраженного

суточного хода уровня. Простые водомерные посты подразделяются на речные, свайные, смешанные (речно-свайные).

**Речные посты** устанавливаются на участках рек, где имеются условия, обеспечивающие их сохранность от повреждения волнением, ледоходом, при сплаве леса или судами. Речные посты наиболее распространены на реках, каналах и озерах с небольшими (до 2-3 м) годовыми амплитудами колебаний уровней воды. Основной принадлежностью речного поста является водомерная рейка. Постовые водомерные рейки бывают металлические, эмалированные, чугунные и деревянные. Посты бывают с вертикальной рейкой и с наклонной рейкой.

**Свайные посты** наиболее удобны для равнинных рек со значительной амплитудой колебаний уровней воды. Водомерные сваи, образующие пост, устанавливают в одном створе, перпендикулярном течению реки. Общее количество свай поста зависит от амплитуды колебаний уровня воды и от угла наклона берегового откоса. Площадка (головка) верхней сваи поста должна быть на 0,25-0,5 м выше исторического уровня воды, а площадка нижней сваи - на 0,5 м ниже наинизшего уровня. Разность высот площадок двух смежных свай должна быть не более 0,8 м, а горизонтальные расстояния между сваями устанавливаются с учетом особенностей берегового откоса и удобства подхода к сваям для производства наблюдений. Свайные посты оборудуют металлическими винтовыми сваями; длина 220 см, диаметр 8 см.



Свайный водомерный пост

**Передаточные водомерные посты** устанавливают в тех случаях, когда подход к воде затруднен из-за отвесных берегов. Передаточные посты бывают различных типов: мостовой пост и тросовый пост.

**Самопишущие водомерные** посты непрерывно регистрируют колебания уровней воды. Самопишущие посты необходимы при значительном суточном ходе уровня, а также при резких колебаниях уровня, вызываемых дождевыми паводками, приливами, стонно-нагонными ветрами, работой гидротехнических сооружений.

**Дистанционные водомерные посты** автоматически передают показания высоты уровня на расстояние. Передача сведений об уровнях может производиться в определенные сроки или непрерывно. дистанционные водомерные посты имеют большое значение для диспетчерской службы на шлюзах, водохранилищах, гидроэлектростанциях, а также малонаселенных и труднодоступных районах. Дистанционные водомерные посты состоят из следующих основных элементов: 1) датчик, 2) канал связи, 3) регистрирующего устройства, 4) источника питания.

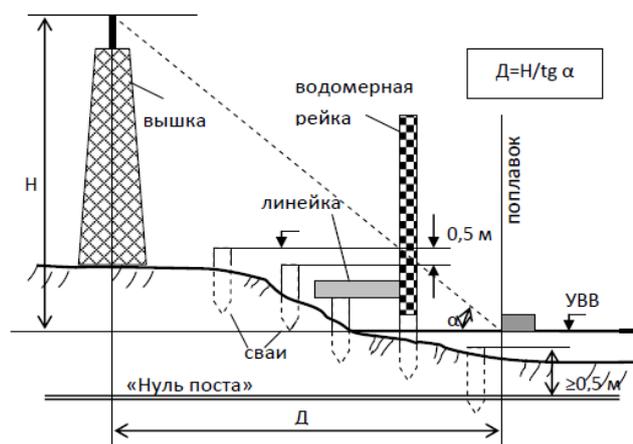
**3. Устройство водомерных постов.** На участке реки в месте перехода для измерения уровней воды устраивается не менее 3-х водомерных постов.

Водомерные посты состоят из приспособления для непосредственного измерения уровней (чаще всего реек и свай) и постоянных геодезических знаков – реперов. От репера передают отметки на сваи или рейки.

Посты размещают в местах, защищенных от размыва, ударов плавующих предметов.

Ниже приведена схема водомерного поста. Наблюдательная вышка устраивается на высоком берегу; она предназначена для засечки одноточечным способом поплавков и плавующих по реке льдин, плотов и судов. Вышка также может быть использована для фиксирования положения лодки, проводящей замеры на реке.

Для каждого водомерного поста устанавливают «нуль водопоста». Это условная горизонтальная плоскость расположена ниже самого низкого уровня воды (не менее чем на 0,5 м), чтобы все результаты измерений были положительными.



**4. Производство наблюдений.** Оно начинается сразу же после завершения подготовительных работ.

Измерение уровней воды ведется непрерывно с момента оборудования постов до окончания всех полевых работ. Сроки и количество замеров в течение суток зависят от интенсивности подъема или спада воды. Количество замеров может колебаться от 3 до 24 раз в сутки в период прохождения паводка (половодья). Отсчеты уровня производятся с точностью до 1 см. Измерения заносятся в полевой журнал. В результате обработки материалов составляются графики колебания горизонтов на всех водомерных постах за время наблюдений.

#### **5. Повторяемость и продолжительность уровня воды.**

При проектировании и эксплуатации гидромелиоративных и водохозяйственных объектов необходимо знать также такие важные характеристики, как повторяемость (частоту) уровней и продолжительность (обеспеченность) их стояния в течении года или многолетнего периода. Для этого строят графики повторяемости уровней.

Повторяемостью уровня называется число случаев (дней или лет) появления уровня в пределах какого - либо заданного интервала.

Повторяемость выраженная в процентах от общей длительности рассматриваемого периода называется частотой.

Продолжительностью стояния уровня называется число дней (или лет) в расчетном периоде, когда наблюдались уровни выше или равные данному уровню. Продолжительность, выраженная в процентах от всего расчетного периода, называется обеспеченность (P%).

Повторяемость уровней каждого интервала за год определяется путем суммирования повторяемостей уровней соответствующего интервала за все месяцы.

Продолжительность стояния уровня (сут) вычисляют путем последовательного суммирования повторяемости уровней за год. Для последнего интервала должна быть равна числу дней в году. Поделив продолжительность в сутках на число суток в году и умножив на 100, можно определить обеспеченность уровней каждого интервала. Для последнего интервала продолжительность стояния уровней равна 365 сут, что соответствует обеспеченности 100%.

### **Глубины воды**

**Глубина** – это расстояние от поверхности воды до дна по вертикали. Теоретически для точного вычисления площади живого сечения глубина должна измеряться в его плоскости, т.е. по нормали к свободной поверхности. Однако уклон водной поверхности рек обычно менее  $10^\circ$  и, следовательно, разница между указанными глубинами не превышает 1,5 %, т.е. лежит в пределах точности измерения глубин. Поэтому для упрощения производства работ глубины измеряют по вертикали.

Значения глубин используются для определения геометрических характеристик живых сечений, построения продольных и поперечных профилей, планов рек в изобатах (линиях равных глубин) и др. Значения необходимы не только для решений этих задач гидрометрического характера, но и для проектирования самих конструкций мостовых переходов и других гидротехнических сооружений.

**Приборы**, которые применяются для измерения глубин в реках, подразделяются на две группы: приборы для измерения глубин в отдельных точках и приборы для непрерывного измерения глубин (профилографы). К первой группе относятся **водомерные и нивелировочные рейки, наметки, ручные и механические лоты**. Ко второй группе относятся **эхолоты**.

Рейками измеряют глубины до 2 м. С помощью наметки измеряют глубины до 6 м. Наметка представляет собой деревянный шест диаметром 4 – 5 см и длиной 4 – 7 м. Шест окрашивается белой масляной краской и размечается на дециметры красной краской. На нижний конец наметки надевается металлический башмак массой 0,5 – 1,0 кг.

Глубины более 6 м измеряют лотом. Он представляет собой чугунный груз массой 0,5 – 100 кг, который имеет цилиндрическую, конусообразную, пирамидальную или рыбовидную форму. Лот опускается в воду или вручную (ручной лот), или с помощью лебедки (механический лот). Ручной лот имеет груз массой до 10 кг. Груз привязывается к пеньковой бечеве (лотлиню). Лотлинь размечается через 10 – 20 см цветными лоскутами или кожаными марками. В качестве лотлиня может использоваться мягкий стальной трос.

Механический лот имеет груз массой до 100 кг. Масса груза и диаметр троса принимаются в зависимости от скорости течения.

Профилографы позволяют непрерывно автоматически регистрировать глубины при большой скорости перемещения (до 17 км/ч) с передачей отсчетов на стрелочный указатель или прибор фиксации данных. По принципу действия их делят на механические, гидростатические и акустические.

Механические профилографы измеряют глубину с помощью промерного груза на тросе или штанги, упирающейся нижним концом в дно (регистрируют ее наклон, который определяется глубиной).

Гидростатические профилографы снабжены датчиком давления, перемещаемым на тросе по дну. Их действие основано на зависимости гидростатического давления на дне от глубины. В качестве датчика обычно используются сильфоны (цилиндры с гофрированной боковой поверхностью).

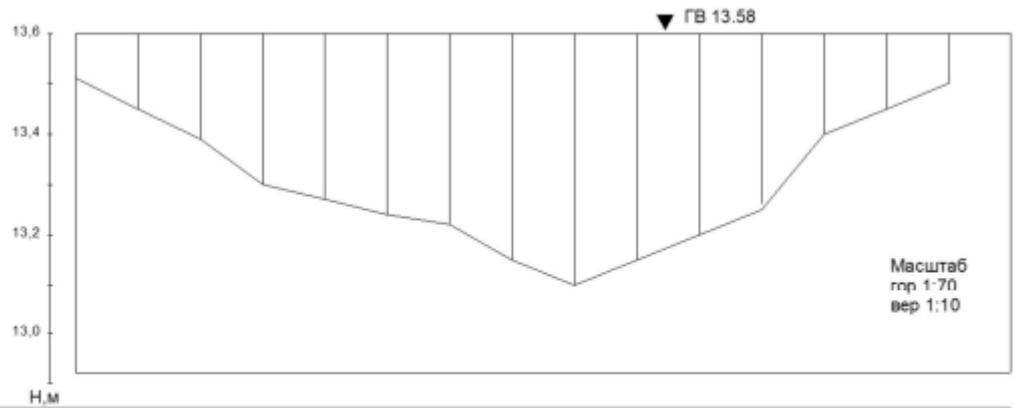
Акустические профилографы (эхолоты) позволяют определить глубину по скорости звука в воде (1460 м/с при 10°C) и по времени хода ультразвуковых колебаний от излучателя до дна и обратно до приемника, которое пропорционально глубине.

При ширине реки менее 300 м и скорости течения не более 1,5 м/с измерение глубин проводится с лодки, которая перемещается по тросу. Поперек реки натягивается трос, размеченный через 2 – 5 м. Один конец троса закрепляется на берегу, а другой конец натягивается на противоположном берегу вручную или с помощью лебедки. Глубины измеряются через каждые 2 – 5 м в зависимости от ширины реки.

С помощью нивелира устанавливается отметка уреза воды. Для этого используется постоянный или временный репер.

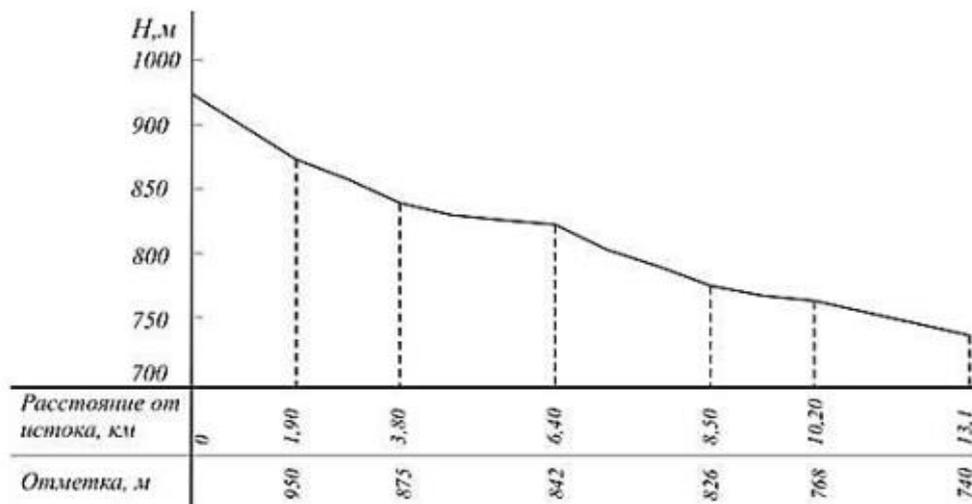
При ширине реки более 300 м измерение глубин проводится с лодки, положение которой фиксируется с помощью теодолита. На берегу реки разбивается базис, в конце которого устанавливается теодолит. Лодка перемещается по гидроствору, который закрепляется береговыми вехами. Положение лодки засекается теодолитом (измеряется горизонтальный угол). С помощью нивелира устанавливается отметка уреза воды.

На основании результатов измерения глубин строится план дна реки в горизонталях или изобатах (линиях равных глубин) и вычерчиваются поперечные и продольные профили реки или водоема, определяют их морфометрические характеристики и др.

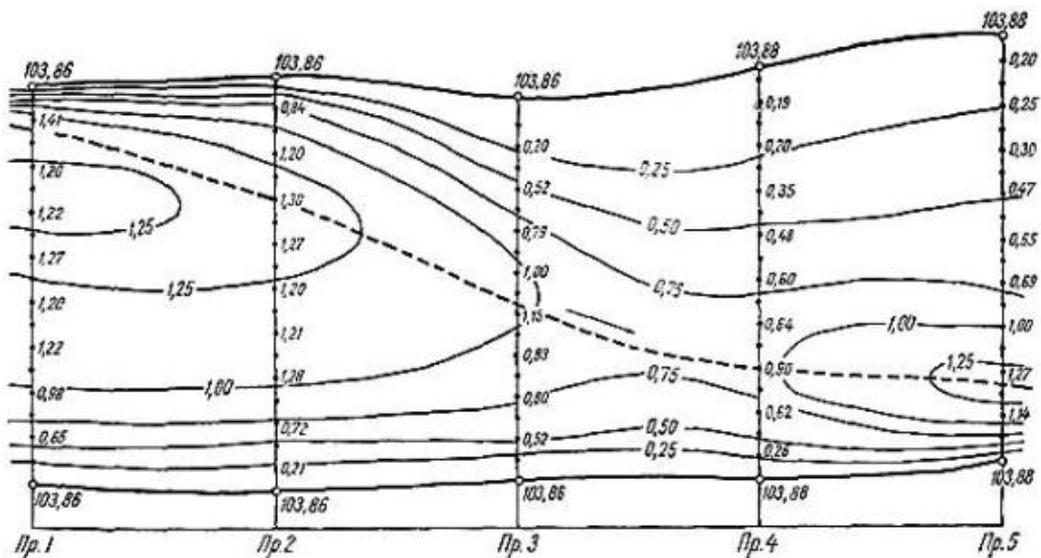


№ промерной вертикали	Пр.б	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Лев.б	
Глубина, м	0,1	0,15	0,20	0,30	0,32	0,36	0,38	0,45	0,50	0,45	0,40	0,35	0,20	0,15	0,10	
Расстояние между вертикалями, м		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5		
Площадь, м <sup>2</sup>		0,12	0,18	0,25	0,31	0,34	0,37	0,41	0,48	0,47	0,43	0,38	0,27	0,18	0,08	0

Поперечный профиль реки



Продольный профиль реки



План реки в изобатах

## Скорости течения

Определение скоростей течения воды необходимо при измерении расходов воды, а также при изучении течений для нужд судоходства и лесосплава, строительства мостов и гидротехнических сооружений, при изучении скоростного поля рек, водохранилищ и озер для решения ряда научных и практических задач.

**Скоростью** течения называется путь, который частица воды проходит в единицу времени.

Скорость течения реки определяется поплавками и специальными приборами – гидрометрическими вертушками.

Распределение скоростей в реке может быть самым разнообразным в зависимости от очертания русла реки в плане, чередования глубин на плесах и перекатах, наличия водной растительности или ледовых образований, изменения уклона по длине реки, шероховатости дна и берегов и от влияния ветра. Характер течения воды в потоке на прямолинейном участке отличается от характера течения на закруглениях; течение также различно на глубоких и мелких участках, в русле реки и на пойме. Поэтому соотношения скоростей в разных сечениях и точках потока могут быть самыми различными.

Кроме того, скорости меняются при изменениях уровня воды; обычно с повышением уровня при правильной форме русла скорости течения воды возрастают.

По ширине реки со свободной водной поверхностью скорости обычно увеличиваются от берегов к середине реки. Распределение поверхностных скоростей по ширине реки может быть представлено плавной кривой, называемой эпюрой скоростей по ширине реки (рисунок1). Наибольшая скорость обычно наблюдается в местах наибольших глубин; на изгибах русла она располагается ближе к вогнутому берегу, а на прямолинейном участке реки - в средней части потока; на пойме скорости значительно меньше, чем в коренном русле.

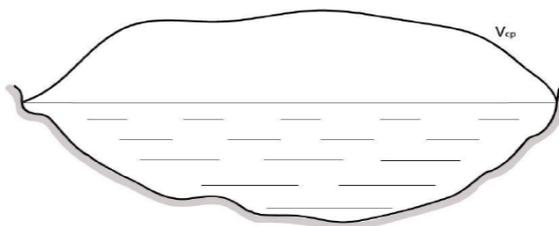


Рисунок 1. Эпюра распределения средних скоростей по живому сечению реки.

Изменение скоростей на различных глубинах по вертикали изображается графически в виде эпюры скоростей. Обычно распределение осредненных скоростей по вертикали представляется в следующем виде: скорость от нулевого значения у дна сначала увеличивается очень быстро, а затем, начиная с некоторой высоты, наблюдается сравнительно небольшое уменьшение (рисунок 2).

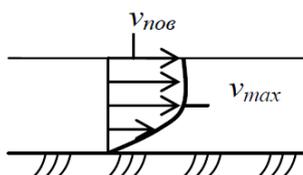


Рисунок 2. Эпюра скоростей в реке

Для нормальных условий в период открытого русла эпюра будет иметь вид (рисунок 3):

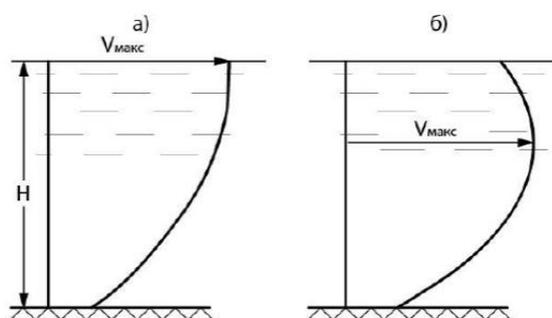


Рисунок 3. Распределение скоростей течения по вертикали.

а - эпюра скоростей в русле при отсутствии ветра, б - при встречном ветре;

Наибольшая скорость находится у поверхности воды и плавно уменьшается ко дну, вблизи которого имеет наименьшее значение.

При наличии ледяного покрова река оказывается как бы заключенной в трубу. Влияние шероховатости нижней поверхности льда приводит к тому, что максимальная скорость оказывается смещенной на значительную глубину. И чем выше шероховатость льда, тем ниже будет располагаться максимальная скорость (рисунок 4).

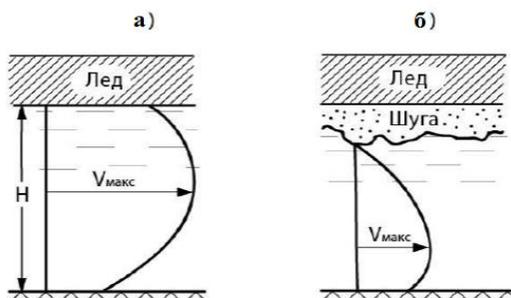


Рисунок 4. Эпюра скоростей при наличии ледяного покрова

а - при отсутствии шуги, б - при наличии шуги.

Очертания эпюр скоростей в зависимости от разных местных условий (неровности дна, ветра, подводной растительности) могут быть самыми различными.

При зарастании русла водной растительностью в значительной мере уменьшается скорость у дна потока вследствие увеличения шероховатости (рисунок 5).

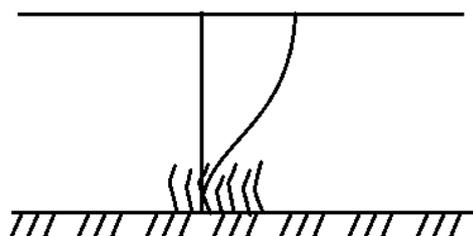


Рисунок 5. Эпюра скоростей на участке реки с водной растительностью.

Иное распределение скоростей наблюдается в устьевых участках реки. При появлении ветров, дующих с моря в сторону реки или при подпоре реки потоком впадающей реки, могут возникать течения противоположных направлений, тормозящие нормальное движение воды (рисунок 6).

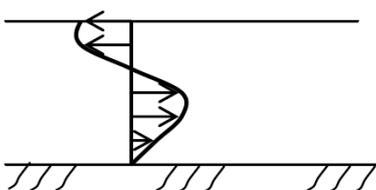


Рисунок 6. Эпюра скоростей в устьевом участке реки с обратными течениями

На плесе скорости меньше, чем на перекате, и скорости у дна значительно отличаются от поверхностных. На перекате скорости значительно больше, чем на плесе, и у дна имеют значения, в некоторых случаях мало отличающиеся от поверхностных.

На перекатах эпюра средних скоростей течения выравнивается по ширине реки по сравнению с плесовыми лощинами. Наибольшая неравномерность распределения скоростей по ширине реки наблюдается на участках поворота русла. В этом случае максимальные скорости течения сосредотачиваются у вогнутого – прижимного берега реки. На рисунок 7 приведены эпюры распределения средних на вертикалях скоростей течения на перекатном участке реки.

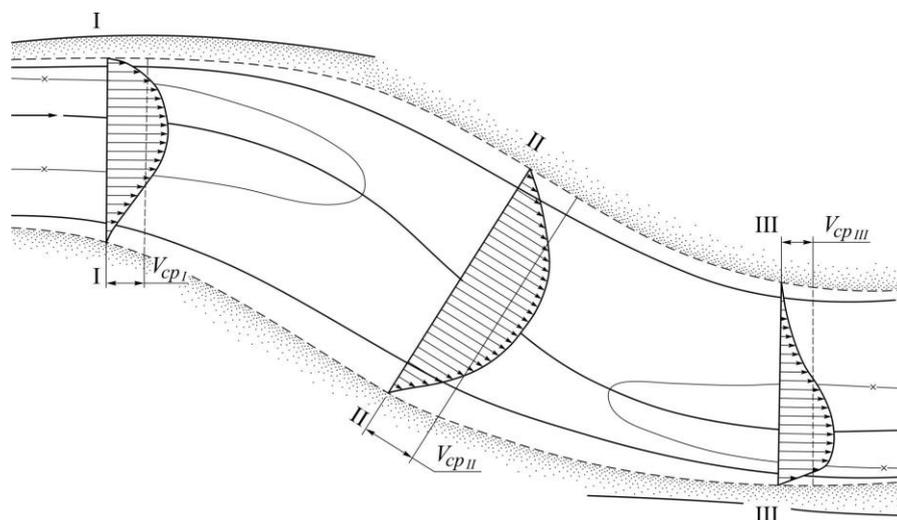


Рисунок 7. Распределение средних скоростей течения на перекатном участке реки

Анализ распределения скоростей течения по ширине реки показывает, что на стрежне потока, в наиболее глубокой части русла, фактические скорости течения воды всегда больше, чем средние по живому сечению.

Общие представления о распределении скоростей по живому сечению дают линии равных скоростей – изотахи (рисунок 8). Изотахи для свободного русла располагаются разомкнутыми линиями, причем максимальные скорости имеют место близко к середине поверхности живого сечения; при ледяном покрове изотахи с максимальными скоростями располагаются замкнутыми линиями, обычно ниже поверхности воды. Линия, соединяющая (в продольном направлении потока) точки с наибольшими скоростями в поперечном сечении потока, называется динамической осью потока.

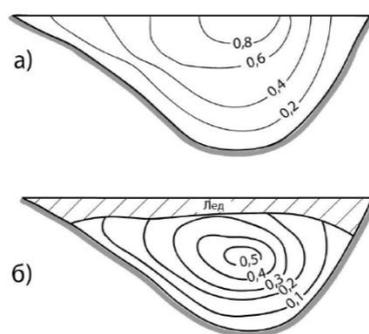
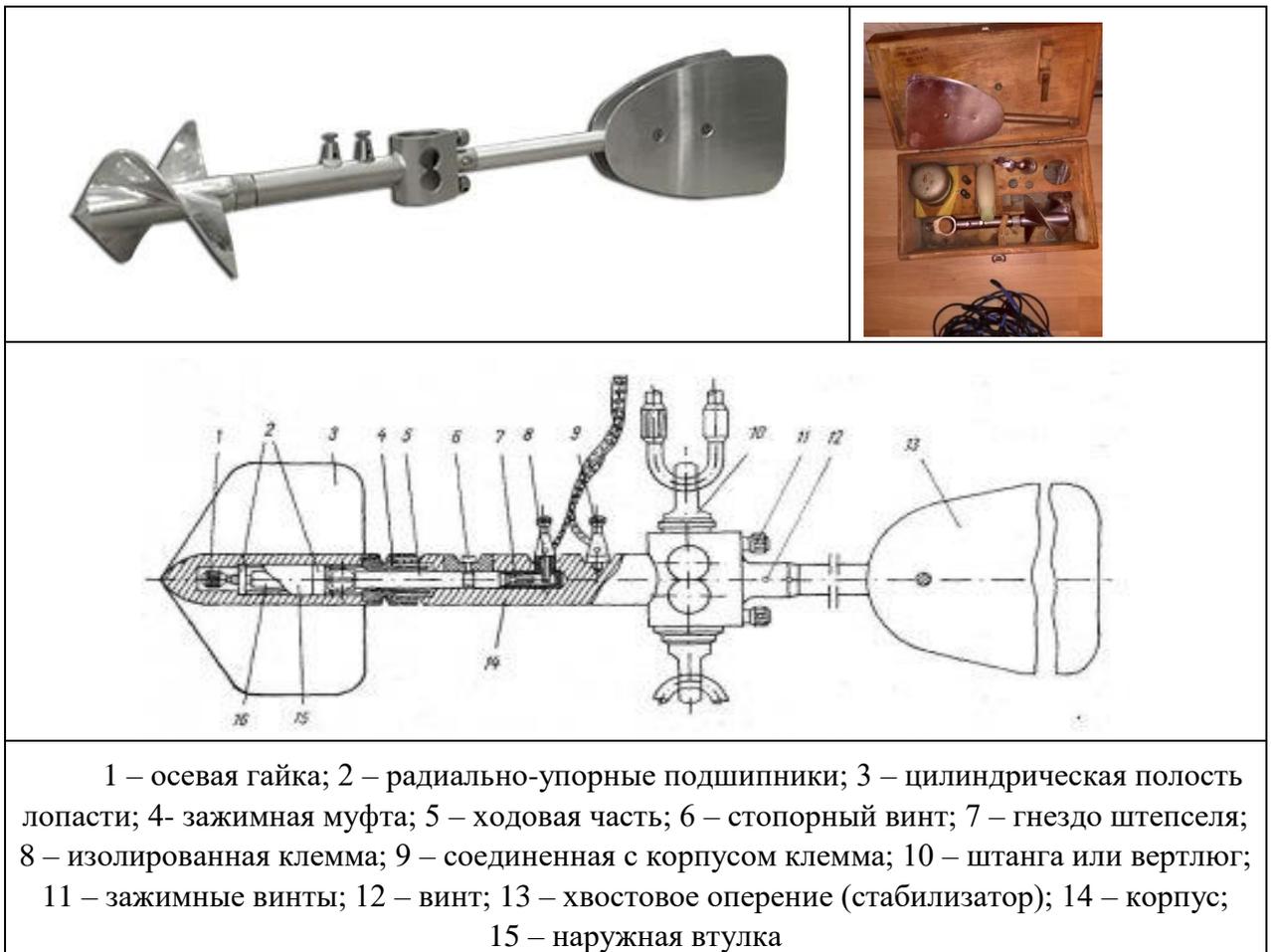


Рисунок 8. Изотахи при открытой водной поверхности (а) и при ледяном покрове (б).

### **Определение средней скорости на вертикали в открытом русле.**

#### Принцип действия гидрометрических вертушек

**Гидрометрическая вертушка** предназначена для измерения скоростей течения реки, как на поверхности, так и на заданной глубине. Вертушки имеют множество модификаций. Распространена в сети гидрологических станций и постов вертушка ГР-21М.



***Гидрометрическая вертушка состоит из:***

- корпуса,
- ходовой части с лопастным винтом и контактным механизмом,
- хвостового оперения,
- сигнального устройства (счетчика-преобразователя оборотов винта вертушки).

Принцип действия. Гидрометрическая вертушка основана на закономерной связи между скоростью вращения лопастного винта вертушки и скоростью наблюдаемого потока. Под влиянием текущей воды лопасть вертушки начинает вращаться. Вместе с лопастью вращается втулка и передает вращение на червячную шестерню. При этом контактный механизм вертушки замыкает электрическую сигнальную цепь через каждый полный оборот червячной шестерни, что соответствует 20 оборотам лопасти вертушки. В момент замыкания цепи вспыхивает лампочка или звенит звонок, что дает возможность фиксировать число оборотов лопастного винта вертушки. С помощью секундомера определяют время с начала работы вертушки (сигнал) до каждого последующего сигнала.

Посчитав общее число оборотов лопасти вертушки и разделив их на время ее работы, определяют скорость вращения лопастного винта (число оборотов в секунду).

Для переходов от скорости вращения ( $V$ ) лопасти вертушки к скорости течения воды используют тарировочную кривую, на которой графически отражена зависимость между скоростью течения и числом оборотов лопастного винта в секунду  $V = f(h)$ .

Для погружения вертушек в воду и установки их в нужных точках живого сечения потока применяют различное установочное оборудование, к которому относятся: штанги, тросы, лебедки, уравнивающие грузы и др.

При глубинах до 3 м вертушки погружают в воду при помощи упорных или подвесных штанг, которые представляют собой металлический трубы, размеченные по высоте через каждые 5–10 см. Первые упирают нижним концом в грунт, вторые укрепляют на неподвижной опоре, например на мостике.

При глубинах более 3 м, когда работать со штангой трудно, вертушки опускают в воду при помощи тонких тросиков диаметром 2–4 мм. Глубину погружения вертушки определяют по меткам на тросике или при помощи специального счетчика глубины. К вертушкам прикрепляют чугунный или свинцовый груз весом от 10 до 80 кг, в зависимости от скорости течения. Трос соединяют с вертушкой и грузом специальным устройством, называемым вертлюгом. Опускают и поднимают вертушки ручной лебедкой.

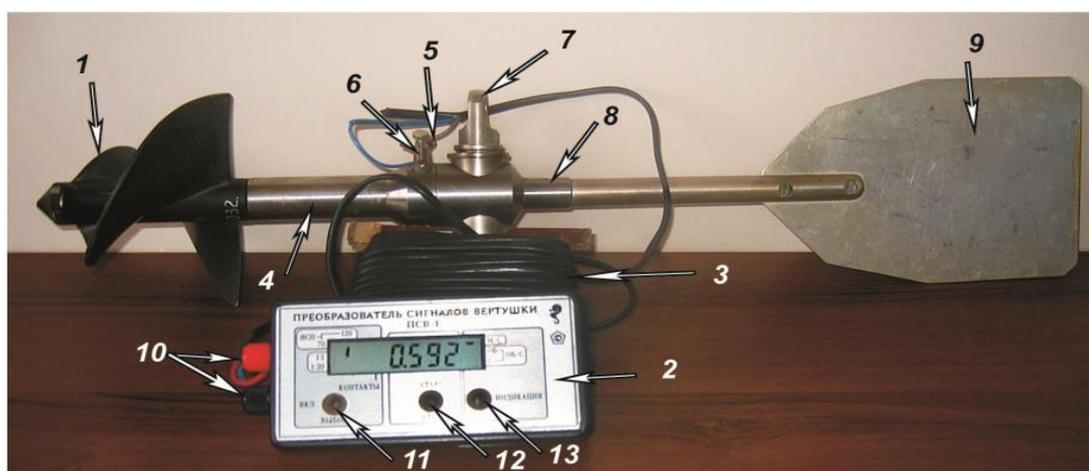


Рисунок Измеритель скорости потока (ИСП-1М).

1 – лопастной винт; 2 – преобразователь сигналов вертушки; 3 – электрический провод; 4 – ось вертушки (находится внутри под ее корпусом); клеммы: 5 – изолированная, 6 – соединенная с корпусом; 7 – вертлюг, 8 – винт стабилизатора, 9 – стабилизатор; 10 – контакты преобразователя; кнопки преобразователя сигналов: 11 – ВЫБОР, 12 – СТАРТ/СТОП, 13 – ИНДИКАЦИЯ

При каждой вертушке должно храниться всегда тарифовочное свидетельство, в котором указывают: тип и номер вертушки; дату последней тарифовки; организацию, проводившую тарифовку; график тарифовки или уравнение тарифовочной кривой.

Вертушки являются точными приборами, требующими бережного отношения и внимательного ухода. Перед сборкой вертушки необходимо тщательно проверить состояние ее частей, обращая особое внимание на состояние винта, оси прибора, подшипников, контактного устройства и электропроводки. После работы вертушку разбирают на основные части, которые очищают, промывают бензином и протирают сначала насухо, а затем тряпкой, слегка смоченной в масле. При работе зимой вертушка может покрыться льдом, который нельзя удалять ударами или соскабливанием. Для удаления льда вертушку следует опустить в теплую воду. При перевозке вертушку необходимо оберегать от сотрясений.

Средняя скорость течения воды на вертикали, вычисляется аналитическим способом в зависимости от числа точек, на которых производилось измерение скоростей.

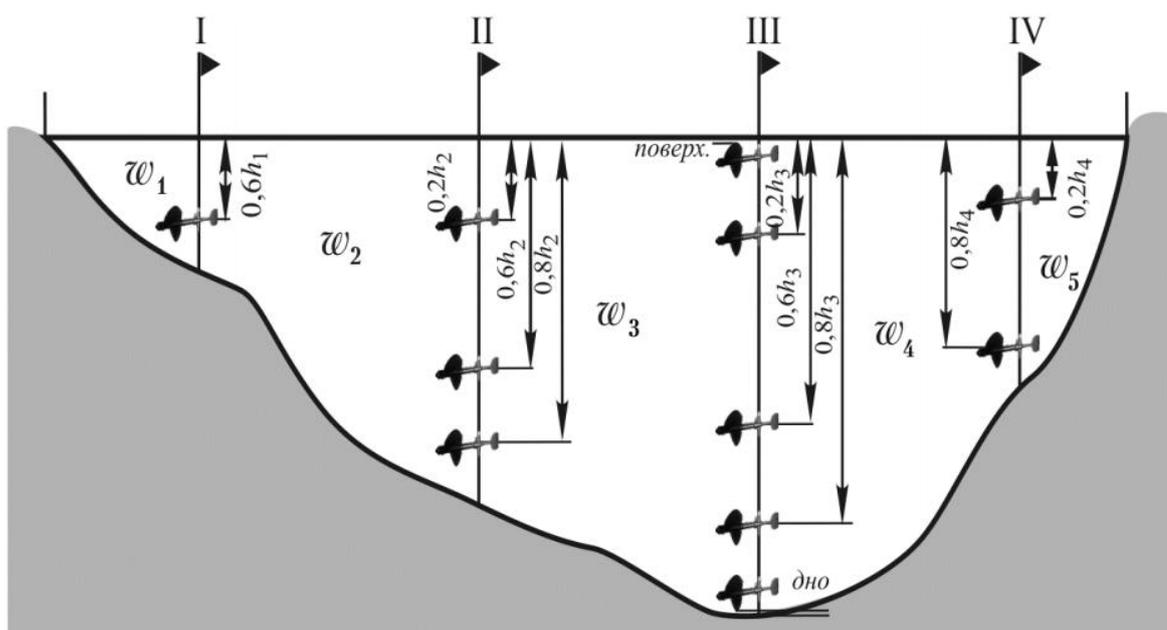


Рисунок 9. Схема расположения точек на скоростных вертикалях гидрометрического створа

1. При измерении скорости в пяти точках на вертикали

$$V_{\text{ср}} = 0,1(V_{\text{пов}} + 3V_{0,2} + 3V_{0,6} + 2V_{0,8} + V_{\text{дно}})$$

2. При измерении скорости в трех точках на вертикали

$$V_{\text{ср}} = 0,25(V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8})$$

3. При измерении скорости в двух точках на вертикали

$$V_{\text{ср}} = 0,5(V_{0.2} + V_{0.8})$$

4. При измерении скорости в одной точке

$$V_{\text{ср}} = V_{0.6}$$

Определение средней скорости по вертикали в русле, заросшем водной растительностью, или при наличии ледяного покрова.

1. При измерении скоростей в шести точках на вертикали

$$V_{\text{ср}} = 0,1(V_{\text{пов}} + 2V_{0.2} + 2V_{0.4} + 2V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{\text{дно}})$$

2. При измерении скоростей в трех точках на вертикали

$$V_{\text{ср}} = \frac{1}{3}(V_{0.15} + V_{0.5} + V_{0.85})$$

3. При измерении скоростей в одной точке

$$V_{\text{ср}} = 0.9V_{0.5}$$

[Вернуться в оглавление](#)

### Лекция 3 Расходы воды.

Измеренный *расход* определяется как объем воды, протекающей через поперечное сечение потока в единицу времени (обычно за одну секунду).

В наиболее простых случаях, при учете средних значений произведения, расход рассчитывают по формуле

$$Q=V\cdot\omega,$$

где  $V$  – средняя скорость течения;  $\omega$  – средняя площадь водного (живого) сечения потока.

Расход воды геометрически представляется как объем водного пространства, заключенный между горизонтальной плоскостью живого сечения и поверхностью, проходящей через концы векторов скоростей течения. Это водяное тело - гидрометрическая модель расхода воды.

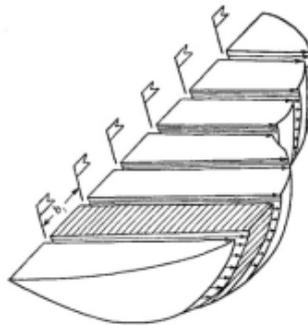


Рисунок. Модель расхода воды в единицу времени

Основные методы измерения расхода:

- 1) метод «скорость-площадь», основанный на измерении поперечного сечения потока и скоростей течения в точках или интегрально на вертикалях, в отсеках и по ширине русла;
- 2) метод «уклон-площадь», использующий продольный уклон водной поверхности, площадь и гидравлический радиус живого сечения;
- 3) метод смешения с вводом в поток индикаторов и определением степени их разбавления;
- 4) объемный метод, основанный на фиксации времени наполнения мерных емкостей;
- 5) гидравлические методы, осуществляемые с использованием специальных расходомерных устройств и характеристик пропускной способности гидротехнических сооружений (труб);
- 6) физические методы – с применением ультразвука, электромагнитной индукции и др.

Гидрологические методы, являющиеся косвенными, так как не требуют измерений самого потока, основаны на связи расходов воды с физико-географическими факторами бассейна реки и позволяют приближенно (с погрешностью до 10 – 30 %) рассчитать средние за длительный период и экстремальные значения расходов.

Каждый из методов может быть подразделен в зависимости от применяемых средств измерения скоростей.

Наиболее трудоемкая операция при определении расхода воды – регистрация и пространственно-временное осреднение скоростей потока. Стремление сократить затраты труда и вместе с тем ускорить производство измерений привело к разработке интеграционных способов определения расходов воды.

В настоящее время получили развитие два способа:

– интеграция скоростей по вертикали вертушками, а также посредством твердых, воздушных и жидкостных поплавков;

– интеграция поверхностных скоростей по ширине потока гидрометрической вертушкой с движущегося судна, а также ультразвуковыми приборами.

**Метод «скорость-площадь».** Расход обычно измеряют в поперечнике реки, который называют *гидрометрическим створом*. Он назначается на прямом неразветвленном на рукава участке реки с правильной формой русла, устойчивым дном и неширокой поймой перпендикулярно среднему направлению течения, желательно вблизи действующего водпоста. Для удобства проведения замеров при небольшой ширине реки строят гидрометрический мостик или с берега на берег над водой натягивается трос с метровой разметкой вертикалей.

Допустим, что в гидрометрическом створе измерены глубины вертикалей  $h$  и вычислены средние скорости  $VB$  на вертикалях, при использовании поверхностных поплавков, по устойчивой связи скоростей:

$$V_{cp} = K_B V_{II}$$

$$V_{cp} = K V_{max}$$

где  $K_B$ ,  $K$  – числовые понижающие коэффициенты, принимаемые при ориентировочных расчетах:  $K_B = 0,85$  и  $K = 0,65$ .

Скорость также рассчитывается по формулам при замерах вертушками:

- в пяти точках на вертикали:

$$V_{\text{ср}} = 0,1(V_{\text{пов}} + 3V_{0.2} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{\text{дно}})$$

- в трех точках на вертикалы

$$V_{\text{ср}} = 0,25(V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8})$$

- в двух точках на вертикали

$$V_{\text{ср}} = 0,5(V_{0.2} + V_{0.8})$$

- в одной точке

$$V_{\text{ср}} = V_{0.6}$$

Тогда общий расход определится суммированием расходов через отдельные площади поперечного сечения между вертикалями:

$$Q = \sum b_i(V_i + V_{i+1})(h_i + h_{i+1})/4.$$

На горных реках в соответствии с уравнением Бернулли возникает значительный уклон уровней от берегов к средней части реки, поэтому поверхностные скорости воды направлены от берегов к оси и поплавки быстро сбиваются к стрежню (линия наибольших поверхностных скоростей). В этом случае измеряют только максимальную поверхностную скорость, запуская 5 – 10 поплавков по стрежню из одной точки и фиксируя время их хода между верхним и нижним створами. За максимальную поверхностную скорость  $V_{\text{max}}$  принимают среднеарифметическую величину из скоростей трёх поплавков с наименьшей продолжительностью хода. Расход определяют по формуле

$$Q = KV_{\text{max}}\omega$$

**Метод «уклон-площадь».** Метод основан на использовании уравнения гидравлики для равномерного движения

$$Q = \omega C(Ri)^{0,5},$$

где  $\omega$  – площадь водного (живого) сечения потока;  $C$  – коэффициент Шези;  $R$  – гидравлический радиус живого сечения;  $i$  – продольный уклон водной поверхности в реке.

Для определения расхода выбирают прямолинейный участок с правильной корытообразной формой поперечного сечения русла.

Значения  $\omega$  и  $R$  определяют по данным промеров глубин в поперечном створе, уклон – нивелированием, а коэффициент Шези  $C$  по эмпирическим формулам, например, по формуле Маннинга:

$$C = R^{1/6}/\eta,$$

где  $\eta$  – коэффициент шероховатости, определяемый в зависимости от характеристик русл

**Метод смешения.** Метод основан на зависимости степени разбавления раствора вещества – индикатора, выпускаемого в поток, от расхода этого потока. Применяется для измерения небольших расходов (до  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ ) в реках с высокой степенью турбулентности, например, на горных реках с бурным течением, небольшими глубинами и крупными валунами в русле, где затруднено применение других методов. Специфика метода состоит в том, что не требуется измерять скорости и площади живых сечений.

Техника и методика применения метода смешения весьма своеобразны. Он может осуществляться следующим образом. На участке реки с турбулентным течением на расстоянии 100 – 1000 м назначают два створа (сечения): верхний – пусковой и нижний – контрольный. В верхнем створе в середине реки вводят раствор поваренной соли с высокой концентрацией  $C_1$ , близкой к насыщению (200 – 300 г/л). Расход  $q$  вводимого раствора поддерживается постоянным и составляет примерно 0,01 – 0,02 % от расхода  $Q$  воды в реке. Благодаря турбулентному перемешиванию концентрация соли резко уменьшается по течению и в нижнем створе становится постоянной по всему объему воды в реке. Причем, чем больше расход реки, тем ниже значение концентрации  $C_2$  в нижнем створе.

Измерив концентрации  $C_1$  и  $C_2$  химическим или электрометрическим (по электропроводности) методом, величину расхода реки  $Q$  вычисляют из условия равенства расходов соли в верхнем и нижнем створах:

$$C_1 q = C_2 (Q + q), \text{ откуда } Q = q(C_1 - C_2) / C_2 .$$

Погрешность метода оценивается в 10%.

**Объемный метод.** По объемному методу расход определяется отношением известного объема  $W$  мерного сосуда или резервуара (бассейна) к времени  $t$  его наполнения:  $Q = W/t$ . Минимальная погрешность метода составляет 0,2 – 0,5%.

**Гидравлические методы.** В гидрометрии для определения расхода широко используют водосливы с тонкой стенкой, которые представляют собой стенку, перегораживающую поток (ручей) поперек и имеющую прямоугольный, трапециевидный или треугольный вырез для пропуска воды. Наибольшее распространение получил треугольный водослив с углом выреза в  $90^\circ$ . Расход воды определяется по измеряемому геометрическому напору  $H$  из формулы

$$Q = 1,4 H^{2,5} .$$

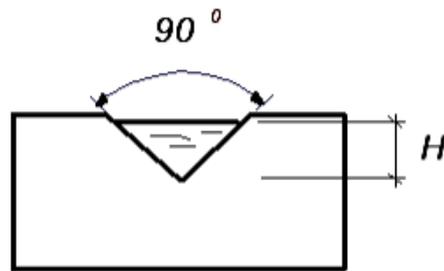


Рисунок Схема треугольного водослива трапецеидальный

При трапецеидальном водосливе с углом  $\text{tg}\alpha=0,25$  используют формулу

$$Q = 1,86 BH^{1,5}.$$

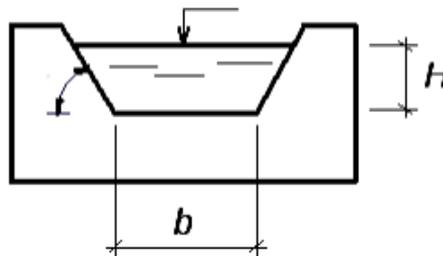


Рисунок Схема трапецеидального водослива

При прямоугольном водосливе с тонкой стенкой  $Q = 1,95 BH^{1,5}$ .

При прямоугольном водосливе с широким порогом  $Q = 1,4 BH^{1,5}$ .

Гидрометрические водосливы дают погрешность 0,5–2%. Водосливами на реках являются плотины. Они могут устраиваться на малых реках и в лабораториях специально для определения расхода воды.

### **Зависимость уровней воды от расходов воды.**

При изменении расходов воды, протекающей через живое сечение реки, изменяется и высота уровня. При устойчивом незаросшем русле и при отсутствии переменного подпора между расходами и уровнями существует однозначная зависимость, т.е. определенному значению уровня соответствует только одно значение расхода воды. Поэтому, имея ряд расходов воды, измеренных при различных уровнях, можно установить зависимость между этими элементами. Связь между расходами воды и уровнями обычно устанавливается графически в виде кривой расходов воды  $Q=f(H)$ .

В ряде случаев однозначная зависимость между расходами воды и уровнем нарушается. Отсутствие однозначной связи между расходом и уровнем может обуславливаться следующими причинами:

- прохождением паводочных волн, когда резко изменяются уклоны на подъеме и спаде уровня;

- неустойчивостью русла, когда вследствие намывов и размывов одному и тому же расходу могут соответствовать различные уровни воды;

- развитием ледовых явлений, вызывающих стеснение живого сечения потока и увеличение шероховатости русла;

- зарастанием русла;

- наличием переменного подпора, когда режим расходов и уровней зависит не только от изменения водности, но и от действия источника переменного подпора;

- выходом воды на пойму, когда на подъеме уровня воды пойма заполняется, а на спаде - опорожняется. При заполнении поймы происходит уменьшение расхода воды, а при опорожнении – увеличение.

Разброс точек измеренных расходов может вызываться не только объективными причинами, но и погрешностями измерений и вычислений. В каждом конкретном случае установлению связи между расходами воды и уровнями должна предшествовать тщательная проверка и анализ материалов наблюдений.

Для построения зависимости  $Q=f(H)$  необходимы:

1) таблица «Измеренные расходы воды» (ИРВ);

2) таблица «Ежедневные уровни воды» (ЕУВ);

3) совмещенные профили поперечных сечений по гидрометрическому створу;

4) поперечный профиль по гидроствору до уровня высоких вод;

5) техническое дело поста;

6) литературные и архивные материалы, характеризующие режим реки на участке гидрометрического створа.

### **Экстраполяция кривых расходов.**

Кривая расходов воды должна охватить полную амплитуду колебаний уровня за тот период, для которого вычисляется сток воды. Если при самых высоких и самых низких уровнях расходы не измерялись, то кривая проводится (экстраполируется) вверх до высшего уровня и вниз до низшего уровня. Кривая расходов считается достаточно надежной, если экстраполяция вверх не превышает 15-20%, а вниз – 5% амплитуды уровней.

Экстраполяция кривой расходов до высшего уровня может быть произведена следующими основными способами:

- непосредственным продолжением обоснованной части кривой расходов;

- по элементам расхода;

- с помощью формулы Шези.

Выбор способа экстраполяции зависит, прежде всего, от формы русла и гидравлических сопротивлений на участке гидроствора.

Экстраполяция кривой расходов, как бы тщательно она ни была произведена, не вполне надежна, так как небольшие отклонения в проведении концевых участков кривой могут привести к значительным ошибкам при определении наибольших и наименьших расходов. Поэтому при планировании и производстве полевых работ необходимо осветить измерениями расходов всю амплитуду колебаний уровня.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 4 Годовой сток при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений.

При гидрологических расчетах применяются следующие обозначения стока:

1. Расход воды  $Q$  — количество воды, прошедшее за 1 секунду через поперечное сечение реки. Расход выражается в  $\text{м}^3/\text{с}$ .

2. Объем стока  $W$  — количество воды, прошедшее через сечение реки за определенный промежуток времени, например, за год,  $\text{м}^3$ .

3. Слой стока  $Y$  — количество воды, прошедшее через поперечное сечение реки за определенный промежуток времени (год, месяц и т. д.) и отнесенное к единице площади водосбора, выражается в мм в год.

4. Модуль стока  $M$  — количество воды, прошедшее через поперечное сечение реки за 1 секунду, отнесенное к единице площади водосбора, выражается в л/с на  $1 \text{ км}^2$ .

5. Коэффициент стока  $\eta$  — отношение количества стока к количеству выпавших в бассейне осадков за тот же период, т.е.

$$\eta = \frac{Y}{X}$$

где  $Y$  — слой стока;  $X$  — слой осадков, мм.

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

Норма годового стока, или средний многолетний сток, является основной и устойчивой характеристикой, определяющей общую водоносность рек и потенциальные водные ресурсы данного бассейна или района. Она служит своего рода гидрологическим «репером», от которого исходят при определении других характеристик стока, например годовых величин разной обеспеченности, сезонных и месячных величин, и имеет очень важное значение при проектировании водохранилищ для гидроэнергетики, орошения, водоснабжения и других видов водохозяйственного строительства.

Устойчивость нормы годового стока определяется двумя условиями:

1) как средняя многолетняя величина она почти не меняется, если к многолетнему ряду будет прибавлено еще несколько лет наблюдений;

2) она является функцией главным образом климатических факторов (осадков и испарения), притом их средних многолетних значений, которые в свою очередь являются устойчивыми климатическими характеристиками района или бассейна.

Норма годового стока может выражаться в виде: среднего годового расхода воды  $Q$  в м<sup>3</sup>/с; среднего годового объема стока  $W$  в м<sup>3</sup>; среднего годового модуля стока  $M$  в л/(с км<sup>2</sup>); среднего годового слоя  $Y$  в мм, отнесенного к площади водосбора.

Выраженная в виде среднего годового модуля стока  $M$  или среднего годового слоя  $Y$  норма годового стока, как и ее климатические составляющие (средние годовые осадки и испарение), достаточно плавно изменяется по территории и поддается картированию.

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

- при наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности – непосредственно по этим данным;

- при недостаточности данных гидрометрических наблюдений – приведением их к многолетнему периоду с использованием данных рек-аналогов с более длинными рядами наблюдений;

- при отсутствии данных гидрометрических наблюдений – по формулам с применением данных рек-аналогов или интерполяцией по картам стока, основанным на совокупности данных наблюдений всей сети гидрометрических станций и постов конкретного гидрологического района.

### **Расчеты стока при наличии данных наблюдений.**

При наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности определение расчетных гидрологических характеристик стока (годового, максимального, минимального и др.) осуществляется путем применения *кривых распределения вероятностей превышения* – кривых обеспеченности.

*Кривая обеспеченности* – графическое или аналитическое выражение функции, характеризующей вероятность появления того или иного значения рассматриваемого ряда случайной величины.

Гидрологические расчеты следует проводить по *однородным рядам наблюдений*. Нарушение однородности рядов стока может происходить в результате изменения естественных факторов формирования

гидрологического режима (переброска стока, строительство гидроузлов, водохранилищ и т. д.).

Оценка репрезентативности (представительности, или достаточной продолжительности) гидрологического ряда за рассматриваемый период осуществляется непосредственно при расчетах.

Рассмотрим порядок гидрологических расчетов на примере *годового стока*. Для примера заранее выбран однородный ряд годового стока р. Друть – д. Румок за 1936–1960 гг. Водпост был закрыт в 1961 г. после создания Чигиринского водохранилища.

При гидрологических расчетах вначале выполняется построение *кривой обеспеченности на клетчатке вероятностей*. Обеспеченность (вероятность превышения) величины годового стока (или любой другой гидрологической характеристики) – это вероятность того, что рассматриваемое значение может быть превышено в совокупности всех ее возможных значений за рассматриваемый период.

Для построения эмпирической кривой обеспеченности вычисляются ее статистические параметры. Члены исходного хронологического ряда наблюдений (графа 3) в графе 4 располагаются в порядке убывания. При этом эмпирическая вероятность (графа 5) определяется по формуле

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

где  $Pm$  – эмпирическая ежегодная вероятность превышения годового стока, %;  $m$  – порядковый номер членов ряда годового стока, расположенных в убывающем порядке;  $n$  – количество членов ряда.

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченности в условиях Беларуси, как правило, применяется аналитическая кривая трехпараметрического гамма-распределения Крицкого – Менкеля. При надлежащем обосновании применяются и другие функции распределения вероятностей – биномиальная (кривая Пирсона III типа) и др.

Статистическими параметрами теоретической кривой обеспеченности (аналитической кривой распределения) являются:

- среднее многолетнее значение годового стока  $Q$ ; в расчетных формулах, приведенных ниже, величины годового стока выражены в виде расходов воды (м<sup>3</sup>/с);
- коэффициент вариации, или изменчивости,  $Cv$ ;
- коэффициент асимметрии  $Cs$ .

*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.

*Коэффициент вариации* (изменчивости) ( $C_v$ ) – безразмерный статистический параметр, характеризующий изменчивость гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения.

*Коэффициент асимметрии* ( $C_s$ ) – безразмерный статистический параметр, характеризующий степень несимметричности распределения ряда рассматриваемой гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения

Вычисление параметров кривой обеспеченности среднегодовых расходов воды  
р. Дзержинский – д. Румок методом моментов. Площадь водосбора 4650 км<sup>2</sup>

№ члена ряда	Год	$Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	В убывающем порядке					
			$Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	$P$ , %	$k_i$	$k_i - 1$	$(k_i - 1)^2$	$(k_i - 1)^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1936	31,2	50,9	4,5	1,77	0,77	0,593	0,456
2	1937	22,0	41,4	9,1	1,44	0,44	0,194	0,085
3	1938	23,0	37,4	13,6	1,30	0,30	0,090	0,027
4	1939	22,0	36,1	18,2	1,25	0,25	0,062	0,016
...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	1956	41,4	22,8	77,3	0,79	-0,21	0,044	-0,009
18	1957	24,9	22,0	81,8	0,76	-0,24	0,058	-0,014
19	1958	50,9	22,0	86,4	0,76	-0,24	0,058	-0,014
20	1959	23,1	20,8	90,9	0,72	-0,28	0,078	-0,022
21	1960	25,5	16,0	95,5	0,56	-0,44	0,194	-0,085
Σ	–	603,5	603,5	–	–	–	1,589	0,419

Величина среднего многолетнего значения годового стока вычисляется:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n},$$

где  $Q_i$  – средний годовой расход воды (м<sup>3</sup>/с) с порядковым номером  $i$ ;  $n$  – количество лет наблюдений. В нашем примере  $\bar{Q} = 603,5 : 21 = 28,7$  м<sup>3</sup>/с.

Коэффициенты вариации и асимметрии теоретической кривой обеспеченности устанавливаются одним из следующих методов: методом моментов, методом наибольшего правдоподобия, графоаналитическим или графическим методом.

В условиях Беларуси при значениях  $C_v \leq 0,6$  наиболее часто используется *метод моментов*. Он рекомендуется также как метод, наиболее

наглядный для учебного процесса. Значения  $C_v$  и  $C_s$  при этом определяются по формулам

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n-1}}, \quad C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{C_v^3 (n-1)(n-2)},$$

где  $k_i$  – модульный коэффициент годового стока, рассчитанный по формуле

$$k_i = \frac{Q_i}{Q}.$$

Величины относительных средних квадратических погрешностей  $\sigma$  (%) статистических параметров теоретической кривой обеспеченности определяются:

$$\begin{aligned} \sigma_{\bar{Q}} &= \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100, \\ \sigma_{C_v} &= \sqrt{\frac{1+C_v^2}{2n}} 100, \\ \sigma_{C_s} &= \frac{100}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n} (1+6C_v^2+5C_v^4)}. \end{aligned}$$

Длина ряда считается достаточной (репрезентативной), если величина  $\sigma_Q < 10$  %. Чем больше коэффициент вариации, тем больше должен быть период наблюдений, удовлетворяющий этому условию.

В представленном примере  $\sigma_Q = 6,1\%$ , т. е. ряд является *репрезентативным*. Если относительная средняя квадратическая погрешность  $\sigma_Q > 10$  % (т. е. период наблюдений *нерепрезентативен*), необходимо осуществлять приведение рассматриваемой гидрологической характеристики к многолетнему периоду согласно требованиям, предъявляемым к расчетам *при недостаточности данных гидрометрических наблюдений*. Опыт показал, что при расчетах годового стока рек Беларуси в большинстве случаев достаточной считается продолжительность периода наблюдений 18–20 лет, т. е. когда выполняется условие  $\sigma_Q < 10$  %.

Для сглаживания и экстраполяции кривых обеспеченности применяется трех-параметрическое гамма-распределение при соотношениях  $C_s/C_v = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; \dots 6,0$ . При  $C_s = 2C_v$  кривая трехпараметрического гаммараспределения совпадает с биномиальной кривой, а при  $C_s = 0$  (нормальное распределение) на клетчатке вероятностей с умеренной асимметричностью она принимает вид прямой линии.

Кривые обеспеченности основных гидрологических характеристик в условиях Беларуси имеют *положительную асимметрию*.

Для построения аналитической кривой используются таблицы ординат кривой обеспеченности (квантилей), представленных в виде модульных коэффициентов  $k_p$  для рассчитанных величины  $C_v$  и соотношения  $C_s / C_v$ . Соотношение  $C_s / C_v$  округляется с точностью до 0,5. В нашем примере соотношение  $C_s / C_v = 1,06/0,28 \approx 4,0$ .

В случае если значение не совпадает с табличным (т. е. кратным 0,1), величину  $k_p$  следует находить интерполяцией между соседними значениями  $C_v$ . Абсолютные ординаты кривой обеспеченности определяются по формуле

$$Q_p = \bar{Q}k_p,$$

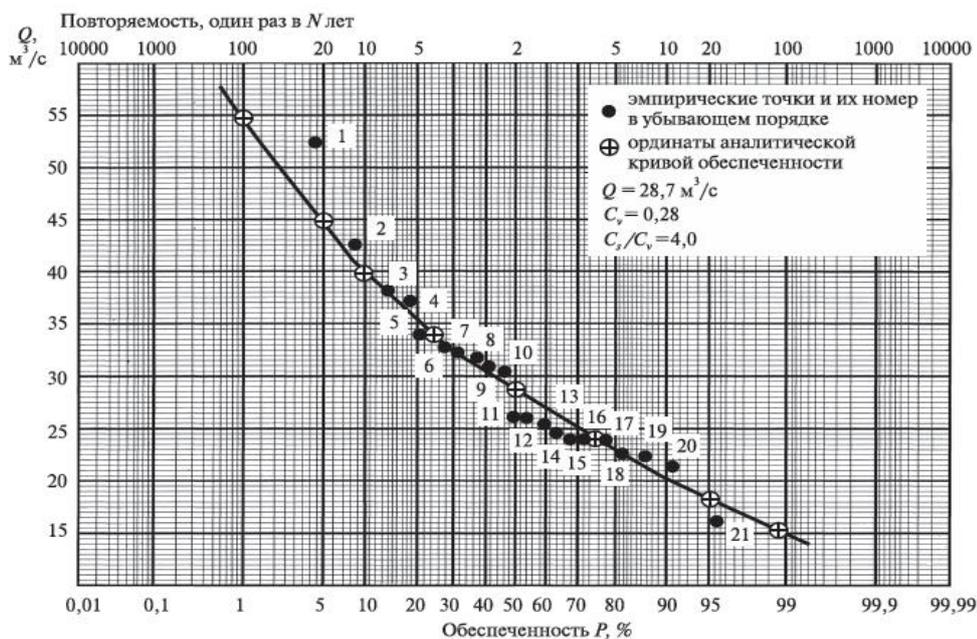
где  $Q_p$  – величина расхода воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) расчетной обеспеченности (%).

По вычисленным ординатам составляется таблица

Ординаты аналитической кривой обеспеченности среднегодовых расходов  
 р. Друть – д. Румок, рассчитанные по методу моментов  
 $\bar{Q} = 28,7 \text{ м}^3/\text{с}; C_v = 0,28; C_s / C_v = 4,0$

$P, \%$	1	5	10	25	50	75	95	99
$k_p$	1,87	1,52	1,36	1,15	0,955	0,802	0,633	0,540
$Q_p, \text{м}^3/\text{с}$	53,7	43,6	39,0	33,0	27,4	23,0	18,2	15,5

Затем на клетчатку вероятностей наносятся эмпирические точки и строится аналитическая (теоретическая) кривая обеспеченности.



Кривая обеспеченности среднегодовых расходов воды ( $Q, \text{м}^3/\text{с}$ )  
 р. Друть – д. Румок (1936–1960 гг.)

Перечень числовых значений *расчетных обеспеченностей*, для которых необходимо рассчитать величину среднего годового расхода воды (или любой другой гидрологической характеристики), назначается согласно утвержденным нормативным документам для каждого вида строительства.

Повторяемостью гидрологической величины (например, среднего годового стока и др.), которая приведена на верхней шкале клетчатки вероятностей, называется число лет  $N$ , в течение которых данная величина случается в среднем один раз. При обеспеченности  $P \leq 50 \%$  число лет  $N = 100 / P$ , при  $P > 50 \%$  число лет  $N = 100 / (100 - P)$ .

Асимметричная кривая обеспеченности имеет характерные точки:  $a$  – центр распределения – точка, соответствующая средней арифметической величине гидрологического ряда;  $b$  – медиана – значение переменной, ордината которой соответствует обеспеченности  $P = 50 \%$ .

На симметричных кривых обеспеченности (при  $C_s = 0$ ) эти характерные точки совпадают, а кривая обеспеченности приобретает вид прямой линии.

Таким образом, рассмотрен первый – расчет гидрологических характеристик при наличии данных наблюдений. С каждым годом длина гидрологических рядов увеличивается, и при пересчете обновленных рядов точность гидрологических расчетов повышается.

В условиях Беларуси длина репрезентативного ряда (для годового стока), как правило, должна составлять не менее 18–20 лет (репрезентативность каждого конкретного ряда определяется расчетами). Гидрологические ряды постов, открытых за последние 20–30 лет, становятся репрезентативными, а гидрологические ряды закрытых постов следует проверять на репрезентативность и при необходимости использовать при инженерно-гидрологических расчетах.

Периодически, каждые 5–10 лет, в системе Белгидромета гидрологические характеристики обновляются и переиздаются в электронном виде. Непосредственно при проектировании учитываются обновленные гидрологические ряды, включая год, предшествующий началу изысканий.

### **Расчеты стока при недостаточности данных наблюдений**

При недостаточности данных гидрометрических наблюдений осуществляется приведение статистических параметров стока в расчетном створе к многолетнему периоду с привлечением данных соседних рек-аналогов, имеющих сравнительно длительный, т. е. репрезентативный, период наблюдений. Оно основывается на статистической (регрессионной)

связи параметров стока соседних рек, имеющих сходные физико-географические характеристики водосборов.

Приведение статистических параметров стока в расчетном створе к многолетнему периоду осуществляется с применением уравнения регрессии при соблюдении следующих условий

$$n' \geq 10; R \geq 0,7; k_1 / \sigma_{k1} \geq 2,$$

где  $n'$  – число лет совместных наблюдений в расчетном (приводимом) створе и створе-аналоге;  $R$  – коэффициент корреляции между значениями стока в расчетном створе и створе-аналоге;  $k_1$  – коэффициент регрессии;  $\sigma_{k1}$  – среднее квадратическое отклонение (ошибка) коэффициента регрессии.

*Коэффициент корреляции  $R$*  – мера тесноты связи между рассматриваемыми характеристиками (переменными).

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n'} (Q_i - \bar{Q})(Q_{ai} - \bar{Q}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n'} (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^{n'} (Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2}}$$

При наличии нескольких рек-аналогов для приведения используются данные того аналога, с которым связь величин стока наиболее тесная и продолжительность периода наибольшая.

На основе полученного численного значения ( $R$ ), ряд наблюдений для исследуемой реки можно удлинить с помощью уравнения регрессии и последующей статистической обработкой полученного ряда (включающего как наблюденные, так и восстановленные значения стока)

Коэффициент регрессии, представляющий тангенс угла наклона линии связи к оси абсцисс, определяется по формуле

$$K_{Q/Q_a} = R \cdot \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_a}}$$

Уравнение прямой регрессии

$$(Q - \bar{Q}) = K_{Q/Q_a} \cdot (Q_a - \bar{Q}_a);$$

При продлении ряда графическим методом строится график связи расходов исследуемой реки с расходами реки-аналога.

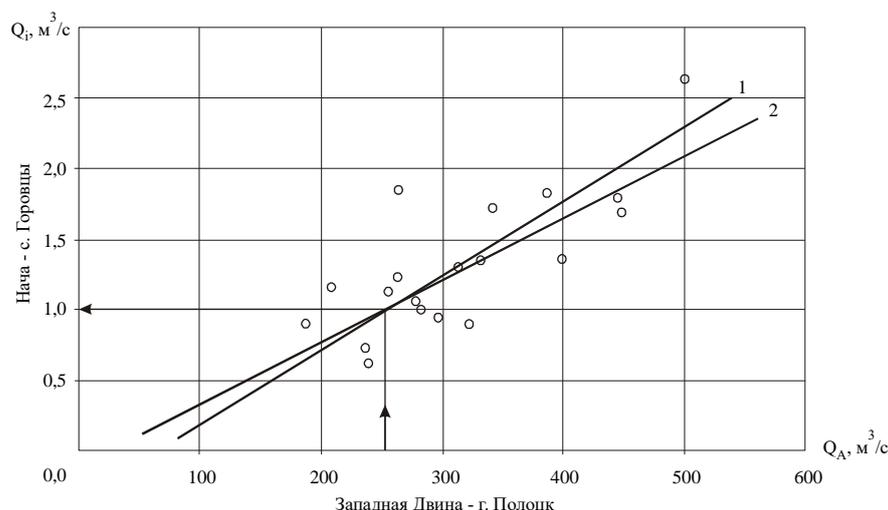


Рисунок. Графики связи средних годовых расходов воды р. Западная Двина-г. Полоцк и р. Нача-с. Горовцы: 1 – графический метод; 2 – аналитический метод.

Приведение исходного ряда к длительному периоду наблюдения осуществляется по двум методам: графическому – значения расходов воды снимаются по графику, с использованием расходов реки-аналога; аналитическому – значения расходов воды определяются по уравнению прямой регрессии, с использованием расходов реки-аналога. При этом учитываются наблюденные значения, а восстановленные значения расходов, по двум методам, берутся в скобки.

Таблица. Восстановленные и наблюдаемые расходы воды

№ пп	Годы	$Q_A, \text{ м}^3/\text{с}$	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$ (по графику)	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$ (по уравнению)
1	2	3	4	5
1	1947	323	0,90	0,90
2	1948	279	1,06	1,06
3	1949	256	1,13	1,13
...	...	...	...	...
33	1979	259	(1,00)	(1,07)
34	1980	305	(1,30)	(1,27)
35	1981	305	(1,30)	(1,27)
Среднее		294	1,27	1,22

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений характеристики стока определяют по картам изолиний рассматриваемой характеристики, если таковые имеются, или по эмпирическим формулам, которые в явной или неявной форме учитывают зависимость искомых характеристик от основных физико-географических факторов стока.

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 5 Применение методов математической статистики в гидрологических расчетах.**

Сток рек меняется из года в год. В этих колебаниях нет строгой закономерности. Вместе с тем величина годового стока колеблется около некоторой средней величины, причем амплитуды таких колебаний неодинаковы в различных физико-географических районах. Между величинами годового стока за два смежных года зависимость практически отсутствует. Такие величины в математической статистике называются случайными величинами, а ряд, образованный ими, вариационным рядом. К изучению случайных величин можно применять методы математической статистики. Применение статистических методов в гидрологии имеет некоторые особенности, обусловленные специфичностью рассматриваемых в гидрологии явлений.

**Первая** из них заключается в том, что формирование стока рек связаны сложным переплетением непрерывно изменяющихся во времени и в пространстве факторов, что придает величине речного стока вероятностный характер. К числу таких факторов прежде всего относятся климат (осадки, испарение и тепло), почвенно-геологические условия, распространение озер, болот и леса на территории бассейна. Особенно велика роль климатических факторов. Влияние неклиматических факторов тем сильнее, чем меньше размеры бассейна и чем короче период, за который рассматривается это влияние. Эти факторы сказываются как на величинах годового стока, так и на его режиме. Причем действие этих факторов проявляется в различных направлениях и вместе с тем эти факторы находятся в постоянном взаимодействии.

**Вторая** из них заключается в том, что в нашем распоряжении имеется ограниченная информация, которая обычно не может быть существенно увеличена. В связи с этим особую важность приобретают вопросы приведения коротких гидрологических рядов и их статистических параметров к длительному периоду, -экстраполяции различных кривых распределения за пределы данных измерений.

**Третья** особенность состоит в том, что ряды измерения речного стока нередко могут оказаться неоднородными как во времени так и в пространстве. Это значительно сужает возможность и осложняет статистическое описание совокупностей гидрологических величин. Чаще всего нарушение однородности рядов стоковых характеристик связано с хозяйственной деятельностью на водосборе.

**Четвертая** особенность применения статистических методов в гидрологии связана с наличием внутрирядной связанности, которая нарушает принцип случайности, в результате чего объем независимой информации, заключающейся в том или ином гидрологическом ряду, уменьшается.

В соответствии с изложенным наряду с генетическим методом в гидрологии широкое распространение получили статистические методы. Следует отметить, что если генетические методы при изучении закономерностей формирования речного стока опираются на физико-математические методы, то статистические методы рассматривают гидрологические процессы как случайные (стохастические) и опираются на математическую статистику.

Характеристики элементов режима реки из года в год изменяются, и данные одного года не могут дать полную картину режима реки. Изменяются: максимальный уровень весеннего половодья, меженные уровни, расходы воды, жидкий и твердый сток, мутность, толщина ледяного и снежного покрова, время наступления характерных явлений и др. По этой причине для более полной характеристики режима реки используют по возможности длительные ряды наблюдений. Исследование таких рядов требует при их анализе знания некоторых основных приемов математической статистики.

Математическая статистика рассматривает явления случайные и позволяет при наличии сравнительно коротких рядов наблюдений делать экстраполяцию возможных вероятностей явлений. Гидрологические явления можно с некоторым приближением рассматривать как случайные и применять к ним методы математической статистики, которые в кратком изложении приводятся ниже.

Основными статистическими характеристиками ряда  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  наблюдений за каким-либо элементом режима реки являются следующие.

1. Среднее значение ряда –  $\bar{x}$ , или центр распределения. Он определяется как среднее арифметическое значение из всех наблюдаемых величин:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

где  $x_i$  - отдельные значения  $x$ ,  $n$  – число членов ряда.

2. Модульный коэффициент членов ряда  $K_i$  – безразмерная величина – определяется как отношение любого члена ряда к его среднему значению  $\bar{x}$ :

$$K_i = \frac{x_i}{x}$$

3. Мода ряда. Наиболее часто повторяющуюся величину ряда называют модой ряда. Например, в ряду 1,2,2,2,3,4,5,6,7 модой ряда будет 2

4. Медиана ряда – среднее по положению значение элемента в ряду, в котором рассматриваемый элемент расположен в убывающем порядке. В рассмотренном ряду медианой будет 3.

5. Среднее квадратичное отклонение или стандартное отклонение ряда  $\sigma$  рассчитывают по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{n}}$$

6. Сумма квадратов отклонений от среднего, деленная на размер выборки ( $n$ ), называется дисперсией  $\sigma^2$ .

Дисперсия служит мерой рассеяния данных около среднего арифметического. Если взять в качестве выборки последовательность чисел 3, 4, 4, 4, 3, то среднее значение для данного ряда будет равно 3.6, а дисперсия составит 0,24. Для выборки 3, 3, 3, 3, 3 среднее равно 3, а дисперсия равна нулю.

7. Коэффициент вариации (изменчивости) ряда  $C_v$  характеризует изменчивость ряда. Два ряда могут иметь одно и то же среднее квадратичное отклонение, хотя изменчивость их будет различной. Так, для двух рядов: 105, 100, 95 и 15, 10, 5, отклонение от среднего будут +5, 0, -5 и +5, 0, -5. Средние квадратичные отклонения по зависимости  $\sigma_x$  для двух рядов будут  $\pm 5$ , но первый изменяется на  $\pm 5\%$ , а второй на  $\pm 50\%$ .

Таким образом, среднее квадратичное отклонение ещё не характеризует изменчивости ряда. Её принято определять относительной величиной – отношением квадратичного отклонения ряда к его среднему значению

$$C_v = \frac{\sigma}{x} \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{\sum_1^n (K_i - 1)^2}{n}}$$

где  $K_i$  - модульные коэффициенты.

$$K_i = \frac{x_i}{x}$$

## 8. Коррелятивная зависимость между гидрометеорологическими характеристиками.

Гидрологические или метеорологические характеристики редко бывают связаны между собой функциональной зависимостью, обычно эта зависимость имеет стохастический характер, при котором какому-либо определенному значению одной характеристики соответствует ряд значений другой. Это говорит не об отсутствии связи между величинами, а о том, что существуют другие факторы, влияющие на данную характеристику, кроме той, связь с которой мы рассматриваем.

Например, при одном и том же (или близком) значении суммы годовых атмосферных осадков в бассейне реки средние годовые модули стока могут меняться в широких пределах. Это объясняется тем, что на сток реки кроме атмосферных осадков оказывают влияние и другие климатические и физико-географические факторы: температура и влажность воздуха, скорость ветра, интенсивность инфильтрации воды в почву, растительность, хозяйственная деятельность человека (задержание снега и талых вод на полях, забор воды на орошение, водоснабжение и проч.), т.е. зависимость стока многозначна.

Для получения аналитического выражения зависимостей в таких случаях применяют метод корреляции. Он позволяет определить степень линейной связи между характеристиками, выражаемую *коэффициентом корреляции*  $r$  и уравнением регрессии.

Корреляцию можно проводить между любыми двумя, тремя и более параметрами, если между ними в природе существует связь. Установив коррелятивную зависимость (уравнения, прямые регрессии), можно по данным одной характеристики за какой-то период найти среднее значение другой, не измеренной за тот же период. Кроме того, для практических целей иногда требуется найти значения гидрометеорологических характеристик (например годового стока рек, атмосферных осадков и др.) за годы, выходящие за пределы периода фактических наблюдений. Коррелятивные связи помогают решить и эту задачу.

Коэффициент корреляции  $r$  изменяется от  $\pm 1$  (функциональная связь, точки лежат на одной прямой) до 0 (связь отсутствует, точки сильно разбросаны).

Связь может быть прямой (коэффициент корреляции положительный), когда две взаимосвязанные величины одновременно увеличиваются или уменьшаются (например, при увеличении количества атмосферных осадков увеличивается сток рек); или обратная (коэффициент корреляции

отрицательный), когда при увеличении одной величины другая уменьшается. Например, при повышении температуры воздуха, а, следовательно, при увеличении испарения сток рек уменьшается.

Для установления надёжной связи надо брать для корреляции как можно более длинный ряд наблюдений. Для гидрологических расчетов коэффициент корреляции считают удовлетворительным при его значении:

$$r \geq \pm 0,75.$$

Однако и меньшие значения коэффициента корреляции позволяют устанавливать закономерности связи между величинами.

Коэффициент корреляции вычисляют по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i)}{n\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} \quad (\text{парная корреляция } x \text{ и } y)$$

Основанное на коэффициенте корреляции уравнение регрессии даёт возможность установить, каким образом изменения данных одной выборки соответствуют изменениям данных другой. Линия регрессии (то есть график некоторой математической функции) наилучшим образом отражает связь между координатами всех точек, нанесенных на график. В подавляющем большинстве случаев корреляция не является полной, поэтому находится уравнение регрессии из условия минимума суммы квадратов отклонений точек от прямой. Если минимизируется сумма отклонений, взятых параллельно оси  $y$ , то получается регрессия  $y$  по  $x$  (обычно  $x$  считается независимой переменной) и соответствующее уравнение приобретает вид:

$$y - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x})$$

Регрессию  $x$  по  $y$  получаем из уравнения

$$x - \bar{x} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y})$$

где  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  - средние значения рядов  $x$  и  $y$ ,  $r$  коэффициент корреляции,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  стандартные отклонения рядов  $x$  и  $y$ .

Косинус угла  $\theta$  между двумя прямыми, задаваемыми этими двумя уравнениями, равен коэффициенту корреляции  $r$ , то есть  $r = \cos\theta$ . В случае полной корреляции обе прямые совпадают, а когда коэффициент корреляции равен нулю, прямые взаимоперпендикулярны.

9. Коэффициент асимметрии ряда  $C_s$  характеризует несимметричность ряда. Он безразмерен, и его определяют по формуле:

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^3}{(n-1)C_v^3}$$

Для его расчета необходимы наблюдения в течение 70 лет и более.

10. Повторяемость и обеспеченность элементов режимов.

В любом речном бассейне гидрометеорологические процессы из года в год меняются. В этой годовой изменчивости яркой закономерности нет, и их поэтому рассматривают как случайные. Методы теории вероятностей применяются, как известно, к явлениям случайным; полностью гидрологические явления случайными признать нельзя.

Кривая распределения является графическим изображением любого статистического ряда переменных величин и показывает повторяемость или частоту их отдельных значений или групп значений.

Обеспеченность – вероятность появления расхода равного или превышающего заданный. Если стоковый ряд расположить в убывающем порядке, то для каждого члена ряда можно определить обеспеченность по формуле:

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

где  $m$  – порядковый номер члена убывающего ряда,  $n$  – число членов ряда.

Для определения расходов редкой повторяемости необходимо экстраполировать кривую с помощью теоретической кривой распределения. Теоретическая кривая распределения – технический инструмент, который позволяет определить расходы редкой повторяемости, которые на реке возможно не наблюдались, но по теории вероятности могут сформироваться.

Для построения кривых обеспечения используются клетчатки вероятности.

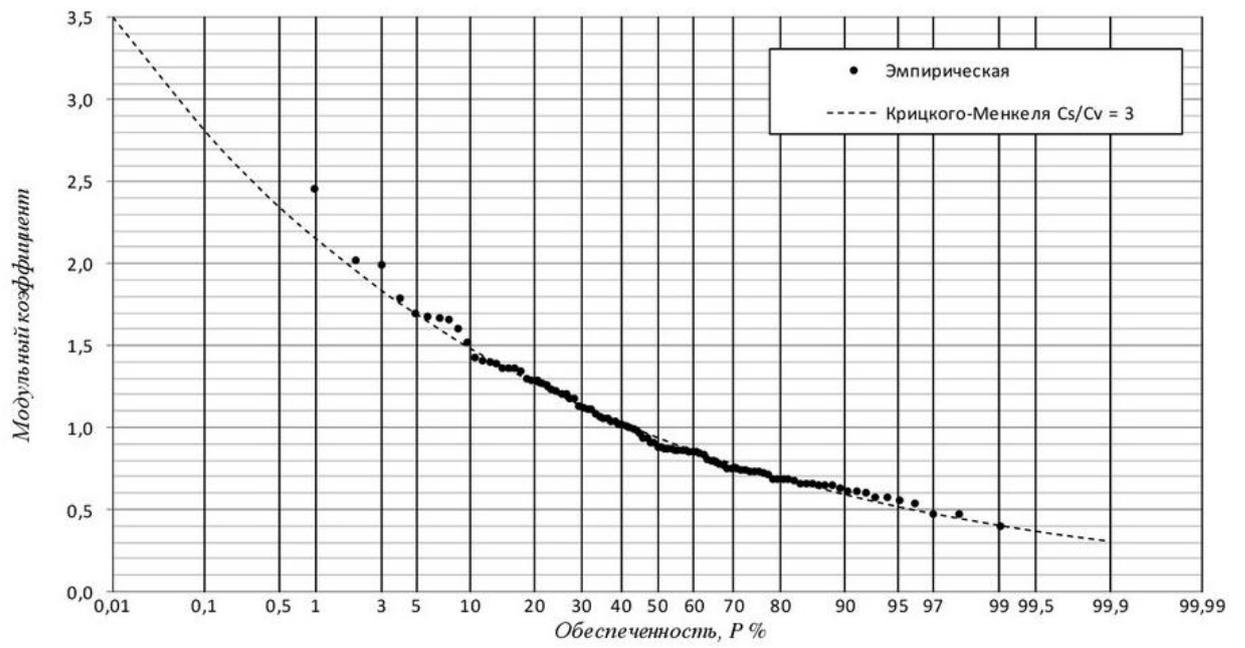


Рисунок Кривые обеспеченности

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 6 Внутригодовое распределение стока.

На внутригодовое распределение стока влияет ряд физико-географических факторов, количественный учет которых часто затруднен. Главными из них являются климатические: внутригодовой ход осадков и испарения. Климатические факторы имеют географическую зональность, что позволило разработать классификацию рек по внутригодовому распределению стока.

Местные (зональные) факторы определяют естественную зарегулированность стока в бассейне. К ним относятся размер и рельеф бассейна, гидрогеологические условия его, озерность, заболоченность; хозяйственная деятельность человека – устройство водохранилищ, осушение болот, вырубка или насаждение леса и пр.

Для расчетов внутригодового распределения стока в зависимости от наличия данных гидрометрических наблюдений применяются следующие **методы**:

1. При наличии данных гидрометрических наблюдений за период не менее 10 лет: а) метод компоновки; б) распределение стока по аналогии с распределением реального года.

2. При отсутствии или недостаточности (менее 10 лет) данных наблюдений: а) по аналогии с внутригодовым распределением стока изученной реки-аналога; б) по районным схемам и региональным зависимостям внутригодового распределения стока от основных физико-географических факторов.

При расчете **по методу компоновки** внутригодовое распределение стока принимается из условия равенства обеспеченности стока за год и лимитирующий сезон. Лимитирующий сезон – период, в котором создаются неблагоприятные условия работы гидротехнических сооружений. В зависимости от типа внутригодового режима сток каждого года делится на три сезона, из которых два маловодных объединяются в один лимитирующий период. Внутри этого периода один из сезонов принимается за лимитирующий.

Сток за год и лимитирующий период, а внутри его за лимитирующий сезон принимается с одинаковой обеспеченностью, равной заданной по условиям проектирования сооружения на реке. При этом сток за нелимитирующий период определяется по разности между стоком за год и стоком за лимитирующий период, за нелимитирующий сезон – по разности между стоком за лимитирующие период и сезон.

Таким образом, распределение стока для заданной обеспеченности производится отдельно: сначала по сезонам, а затем внутри сезонов (по месяцам и декадам). Расчет внутригодового распределения стока ведется по водохозяйственным годам, т. е. начинающимся с многоводного периода года.

Лимитирующий период, сезон и месяц назначаются в зависимости от типа внутригодового режима стока. Для рек с весенним половодьем, в качестве лимитирующего периода принимаются лето, осень и зима; для рек с летним половодьем (высокогорные районы) – осень, зима и весна.

Преимуществом метода компоновки расчета внутригодового распределения стока по сравнению с другими является более эффективное использование материалов, непосредственных наблюдений, позволяющее для сравнительно короткого ряда получить надежные результаты.

Определение внутригодового распределения стока **методом реального года** основано на выборе расчетного водохозяйственного года из числа фактических с использованием принципа наибольшей близости вероятностей превышения стока за водохозяйственный год, лимитирующий период, лимитирующий сезон и лимитирующий месяц к расчетной вероятности превышения.

Расчетное распределение стока в этом методе вычисляют путем умножения месячных долей стока на годовой объем стока расчетной вероятности превышения, определяемый по аналитической кривой обеспеченности.

Внутригодовое распределение стока следует рассчитывать по водохозяйственным годам, начиная с многоводного сезона. Границы сезонов назначаются едиными для всех лет с округлением до месяца. Деление года на периоды и сезоны производится в зависимости от преобладающего вида использования стока. Период года и сезон, в которых естественный сток может лимитировать водопотребление, принимаются за лимитирующие период и сезон.

Для расчета внутригодового распределения стока применяем *метод реального года*. Суть метода – выделить из ряда лет водохозяйственный год наиболее близкий к заданной вероятности превышения как за год так и за лимитирующий период (сезон). Затем, зная процентное распределение месячных расходов внутри этого реального года, по аналогии выполнить внутригодовое распределение для заданного года.

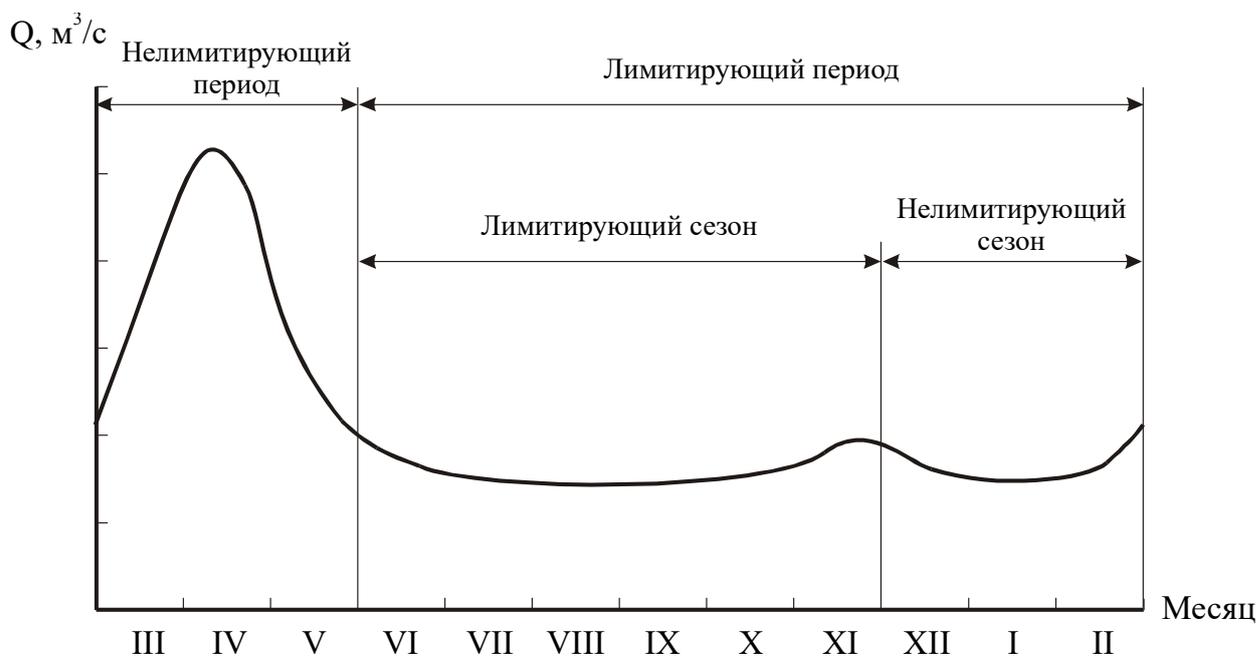


Рисунок. Средний многолетний гидрограф стока

Прежде всего, устанавливается начало и конец сезонов, лимитирующий период и сезон. Проанализировав ход изменения средних месячных расходов, видим, что весна охватывает май-март (многоводный сезон). Лето-осень включает июнь-ноябрь, а зима – декабрь-февраль. Поскольку проектируемое водохранилище на р.Нача-с.Горовцы предназначено для целей гидроэнергетики и водоснабжения, то лимитирующим сезоном будет зима, а лимитирующим периодом – маловодный период, включающий два сезона: лето-осень и зиму.

*Таблица. Суммы средних месячных расходов р.Нача - с.Горовцы за сезоны и год, м³/с.*

Водохозяйственный год	Весна (III-V)	Лето-осень (VI-XI)	Зима (XII-II)	Сумма (за год)
1	2	3	4	5
1947-1948	7,57	1,46	3,56	12,59
1948-1949	7,29	1,99	1,33	10,61
1949-1950	8,92	2,76	2,21	13,89
...	...	...	...	...
1962-1963	13,36	14,45	3,87	31,68
1963-1964	9,54	2,38	1,50	13,42
1964-1965	8,04	1,34	1,88	11,26

Для выбора реальных лет со стоком за год и сезоны, близким к расчетной (в нашем случае 90%) обеспеченности составляется таблица, в которую записываются суммы средних месячных расходов воды за все сезоны и год (водохозяйственный, т.е. начинающийся с марта текущего года и заканчивающийся в феврале следующего), и таблицу 3.2, куда

выписываются суммы средних месячных расходов воды за год и лимитирующий период (сезоны) в убывающем порядке. В графу 8 таблицы записывается вычисленная по формуле  $Pm = \frac{m}{n+1} \cdot 100$ .

*Таблица. Сумма средних месячных расходов р.Нача - с.Горовцы за сезоны и год в убывающем порядке, м<sup>3</sup>/с.*

№ п/п	Год	Q <sub>ср.м.</sub> за год	Год	Q <sub>ср.м.</sub> за лето-осень	Год	Q <sub>ср.м.</sub> за зиму	P, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1962-1963	31,68	1962-1963	14,45	1950-1951	4,64	5,3
2	1956-1957	23,28	1952-1953	10,68	1952-1953	4,07	10,5
3	1951-1952	20,92	1957-1958	8,21	1960-1961	3,88	15,8
...	...	...	...	...	...	...	...
16	1961-1962	10,48	1947-1948	1,46	1953-1954	0,85	84,2
17	<b>1959-1960</b>	9,94	1964-1965	1,34	1951-1952	0,65	<b>89,5</b>
18	1960-1961	9,07	<b>1959-1960</b>	0,57	<b>1959-1960</b>	0,24	94,7

Внутригодовое распределение стока реального года может быть принято в качестве расчетного, если вероятность превышения стока за год и за лимитирующие период и сезон, а также минимального месячного расхода, близки между собой и соответствуют заданной, по условиям проектирования, вероятности превышения. Анализируя данные таблицы, приходим к выводу, что наиболее близким к очень маловодному году является 1959-1960 водохозяйственный год (выделенный в таблице), так как обеспеченность годового стока (89,5%), лимитирующих сезонов лета-осени (94,7%) и зимы (94,7%) наиболее близки к заданной (90%). Этот год и принимается в качестве расчетного.

Распределение стока по месяцам для установленного таким образом маловодного (реального года) показано в таблице. Используя внутригодовое распределение стока реального года, получено внутригодовое распределение стока для расходов заданной обеспеченности.

Полученное по клетчатке вероятностей значение расхода заданной обеспеченности  $Q_{90\%} = 0,74 \text{ м}^3/\text{с}$ , предварительно умножив его на 12:  $0,74 \cdot 12 = 8,88 \text{ м}^3/\text{с}$  принимают за 100%. Обозначая сток за месяц через  $X$  и, пользуясь данными таблицы 3.3, получаем для III (марта) месяца значение  $X = \frac{8,88 \cdot 31,9}{100} = 2,83 \text{ м}^3/\text{с}$ , которое заносим в таблицу 3.4.

*Таблица. Внутригодовое распределение стока р.Нача – с.Горовцы за 1959-1960гг.*

Очень маловодный год (1959-1960)												
Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
в м <sup>3</sup> /с	3,17	5,03	0,94	0,32	0,08	0,02	0,02	0,04	0,09	0,12	0,05	0,06
в %	31,9	50,6	9,50	3,20	0,80	0,20	0,20	0,40	0,90	1,20	0,50	0,60

*Таблица. Внутригодовое распределение стока р.Нача – с.Горовцы за расчетный год.*

Очень маловодный год (90%)												
Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
в %	31,9	50,6	9,50	3,20	0,80	0,20	0,20	0,40	0,90	1,20	0,50	0,60
в м <sup>3</sup> /с	2,83	4,49	0,84	0,28	0,07	0,02	0,02	0,04	0,08	0,11	0,04	0,05
млн.м <sup>3</sup> /мес	7,34	11,64	2,18	0,73	0,18	0,05	0,05	0,10	0,21	0,29	0,10	0,13

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 7 Максимальные расходы воды весеннего половодья и дождевых паводков.**

Максимальным расчетным расходом воды ( $Q_{p\%}$ ) называется расход воды, на пропуск которого рассчитываются размеры плотин, мостов и труб. Расчетная вероятность превышения этого расхода  $P\%$  зависит от капитальности сооружений и изменяется от 0,01 до 1% (ГТС). Для водопропускных сооружений на ж/д и а/д  $P\%$  изменяется от 0,33 до 2.

По происхождению  $Q_{p\%}$  делятся на три группы:

- снеговой максимум,
- дождевой максимум,
- смешанный максимум (совместное действие снеготаяния и дождей).

При наличии или недостаточности данных наблюдений расчеты  $Q_{p\%}$  производятся по кривым обеспеченности или рекам-аналогам. К полученным значениям прибавляется гарантийная поправка (не более 20%), которая зависит от числа лет наблюдений и ошибки определения расчетного расхода.

В тех случаях, когда мы сомневаемся в том, какой максимум является расчетным, то рекомендуется построить отдельно для снегового и дождевого максимальных расходов воды кривые обеспеченности. По заданным значениям  $Q_i$  находим  $P\%$  для совместной кривой (по теории сложения вероятностей).

При отсутствии данных наблюдений расчеты максимальных расходов проводятся согласно **ТКП 45-3.04-168-2009**.

Для определения **максимальных расходов весеннего половодья** для водосборов от элементарной площадки (менее 1 км<sup>2</sup>) до 20000 км<sup>2</sup> (средние реки) применяется редуccionной формуле:

$$Q_{p\%} = K_o \cdot h_{p\%} \cdot \mu \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot F / (F+b)^n, \text{ м}^3/\text{с},$$

где:  $h_{p\%}$  - слой весеннего стока расчетной обеспеченности, мм. Определяется по рекам-аналогам или картам-схемам. Изменяется от 50 (лесостепь) до 250 (лесная зона) мм.

$K_o$  – параметр, характеризующий дружность половодья. Определяется по данным рек-аналогов обратным путем по этой же формуле. Характеризуется отношением  $q/h$ . Изменяется от 0,004 до 0,009.

$\mu$  - коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов; изменяется от 1 до 1.04.

$\delta$  - учитывает влияние водохранилищ, прудов (снижение). Для  $P\% > 5\%$  равен 1.

$\delta_1$  - учитывает снижение максимума от залесенности,

$\delta$  - учитывает снижение максимума от заболоченности,  
 $F$  - дополнительная площадь, учитывающая снижение редукции,  
 $p$  - показатель степени редукции.

Все эмпирические коэффициенты в этой формуле находятся согласно указаниям ТКП.

### Максимальный сток воды рек дождевых паводков

Расчетная формула I типа (редукционная) для определения  $Q_{\max, P\%}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , при наличии одной или нескольких рек-аналогов имеет вид:

$$Q_{\max, P\%} = q_{P\%, a} \cdot \varphi_m \cdot \frac{\delta \delta_2}{\delta_a \delta_{2a}} \cdot A,$$

где  $q_{P\%, a}$  — модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога расчетной вероятности превышения  $P\%$ ,  $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ ;

$A$  — площадь водосбора,  $\text{км}^2$ ;

$\varphi_m$  — коэффициент, учитывающий редуцию максимального модуля стока дождевого паводка  $q_{1\%}$  с увеличением площади водосбора  $A$ ,  $\text{км}^2$ , и рассчитываемый в зависимости от значения коэффициента  $k_\Phi$ , представляющего соотношение коэффициентов формы водосбора исследуемой реки и реки-аналога;

$\delta, \delta_a$  — коэффициенты соответственно для исследуемой реки и реки-аналога, учитывающие снижение максимальных расходов воды проточными озерами; определяются по формуле ТКП, где  $c = 0,2$ , при наличии сведений только об относительной озерности —  $c = 0,11$ ;

$\delta_2, \delta_{2a}$  — коэффициенты соответственно для исследуемой реки и реки-аналога, учитывающие снижение максимального расхода воды вследствие заболоченности водосбора, определяются по формуле ТКП.

При невозможности подобрать реку-аналог, максимальные мгновенные расходы воды дождевых паводков  $Q_{\max, P\%}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ , обеспеченности 10 % вычисляются по формуле II типа, которая имеет вид:

$$Q_{\max, P\%} = \frac{q_{10\%} \delta \lambda_{P\%}}{\Phi^{0,8}} \cdot A,$$

где  $q_{10\%}$  — модуль максимального срочного расхода воды ежегодной вероятности превышения  $P=10\%$ , определяется интерполяцией между данными наблюдений соседних гидрологически изученных рек в исследуемом районе или по карте;

$\lambda_{P\%}$  — переходный коэффициент от максимальных срочных расходов воды ежегодной вероятностью превышения  $P = 10 \%$  к значениям другой вероятности превышения  $P < 25 \%$ ; назначают по данным гидрологически изученных рек в исследуемом районе по значениям, приведенным в таблице ТКП.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 8 Климатические факторы стока.

Основными характеристиками гидрологического режима, которые наиболее часто используются в практических целях, являются **речной сток и уровни воды**.

Для характеристики речного стока используются следующие величины:

1. Мгновенные расходы воды, характеризующие водность реки в данный момент времени,  $\text{м}^3/\text{с}$ . Расход воды – объем воды, протекающий в 1 с через поперечное сечение реки.

2. Средний расход воды за сутки, месяц, год ( $Q_{\text{ср}}$ ),  $\text{м}^3/\text{с}$ .

3. Объем стока ( $\text{м}^3$ ):  $W = Q_{\text{ср}} \cdot t \cdot 24 \cdot 3600$ , где  $t$  – период стока, сут.

4. Модуль стока ( $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ ):  $M = Q_{\text{ср}}/F$ , где  $F$  – площадь водосбора.

5. Слой стока ( $\text{мм}$ ):  $h = K \cdot W/F$ , где  $K$  – коэффициент размерности.

Режим стока формируется в процессе взаимодействия взаимосвязанных **физико-географических факторов и хозяйственной деятельности человека**.

Физико-географические факторы могут быть разделены на две основные группы:

а) группа климатических факторов

б) группа факторов, влияющих на условия стекания воды в бассейне.

К наиболее значимым климатическим факторам относят:

1. Запасы воды в снеге.

2. Количество и интенсивность осадков, выпадающих на водосбор.

3. Температура и влажность воздуха, солнечная радиация, определяющие испарение.

Факторы условий стока воды в бассейне:

1. Рельеф.

2. Почвенный и растительный покров.

3. Степень влажности и промерзания почвогрунтов

4. Геологическое строение водосбора.

5. Глубина залегания подземных вод.

6. Залесенность, заболоченность, озерность и т.д.

**Хозяйственная деятельность, влияющая на сток:**

1. Гидротехническое строительство (устройство прудов и водохранилищ, гидростанции, мостовые переходы)
2. Осушительные и оросительные мелиорации (регулирование водоприемников, каналы, дренаж)
3. Водозабор.
4. Переброска стока между бассейнами рек.
5. Урбанизация водосбора.

Влияние указанных факторов стока учитывается при определении расчетных характеристик стока, которые используют для определения параметров ГТС: водопропускных труб, мостов, систем водоснабжения и водоотведения и т.д. К ним относят, например, максимальные или минимальные расходы воды расчетной обеспеченности.

**Атмосферное давление** главным образом оказывает влияние, формирует воздушные потоки, определяет силу и скорость ветра. Вместе с тем атмосферное давление оказывает влияние на процессы испарения. С уменьшением давления испарение увеличивается. Там, где атмосферное давление изменяется незначительно, его влияние на испарение мало. Особенно сильно на величину испарения атмосферное давление оказывает в горах. Кроме того, атмосферное давление оказывает влияние на колебания уровня грунтовых вод и на охлаждение почвы под снегом.

Воздушные потоки, формирующиеся в различных географических условиях, имеют свои особенности. Арктический воздух – холодный, с малым содержанием влаги. Полярный воздух, или воздух умеренных широт, более теплый и влажный. Приходя с океана на материки, в основном, с западными потоками, он приносит атмосферные осадки, являющиеся основным источником питания рек. Тропический воздух – теплый, влажный, приходит в умеренные широты из субтропиков. Экваториальный воздух – очень теплый и влажный, идущий от экватора в более высокие широты.

Воздушные потоки образуются над океанами и материками. Их свойства неодинаковы, поэтому и различают морские (более влажные) и континентальные (более сухие) воздушные потоки. Режим рек в значительной мере определяется свойствами поступающего в их бассейны воздуха. **Ветры**, их скорость и направление, являются важнейшей характеристикой перемещения воздушных потоков, а вместе с тем и влаги. Ветры оказывают существенное влияние на ряд элементов режима бассейна реки. Направление и скорость ветра очень изменчивые величины. Ветер

обычно дует порывами. Их направления и скорость резко разнятся между собой, характеризуя так называемую структуру ветра.

В растительном покрове скорость ветра уменьшается. В траве скорость ветра может быть в 10 раз меньшей, чем над травой. В лесу скорость ветра падает в десятки раз. Скорость и направление ветра обычно определяют по восьми румбам. Для характеристики ветра строят графики – розы ветров. Даже очень близко расположенные станции в бассейне реки могут иметь различные розы ветров, так как условия местности оказывают очень сильное влияние на направление и скорость ветра.

Большое влияние на условия испарения оказывают суховеи – сухие ветра. Суховеи, повышая транспирацию растениями и испарение с поверхности почвы, существенно влияют на влагосодержание в почвах и уровень грунтовых вод. Особенно велико влияние суховеев в районах с недостаточным увлажнением.

Скорость и направление ветра оказывают влияние на ряд гидрометеорологических явлений.

При скорости ветра 3м/с процессы испарения и транспирации усиливаются в 1,5-2 раза. Ветер усиливает механическое испарение с водной поверхности, отрывая и унося частицы воды в атмосферу. Также при ветре 1-3м/с увеличивается таяние снега почти в два раза по сравнению со штилевой погодой. Ветер переносит снег с равнин в понижения и балки. Ветер на реках, особенно в устьях, может менять уровни воды на 1-3м, вызывая наводнения (р.Нева). Также он оказывает влияние на скорость течения, расходы воды, движение льда, формирует течения. Создавая волнения, усиливает абразионные процессы и др. Проходя над поверхностью бассейнов рек, ветер сносит испарившуюся влагу, увеличивая таким образом недостаток насыщения и соответственно испарение.

Большое влияние на режим рек оказывает *температура воздуха*. Она в значительной степени определяет климатические сезоны, испарение, влагообороты, сток, ледовые и другие гидрометеорологические явления. Чем выше температура воздуха, тем больше испарение и меньше сток.

Выделяют суточный, годовой и многолетний ход температуры воздуха. Повышение температуры воздуха начинается сразу после восхода солнца, когда приход тепла становится больше его расхода.

Нагревание земной поверхности от восхода солнца до полудня увеличивается, а затем начинает убывать, но температура воздуха возрастает

и достигает максимального значения около 13-14 часов, поскольку нагрев нижних слоев атмосферы происходит от подстилающей поверхности.

Суточный ход температуры воздуха обуславливает и суточный ход испарения как с поверхности речных бассейнов, так и с водной поверхности, а также суточный ход стока малых рек с талым ледниковым питанием и стока рек в районах вечной мерзлоты.

Амплитуда суточного хода температуры воздуха в значительной степени зависит от свойств подстилающей поверхности. Песчаная и каменистая почва, особенно в низких широтах, может нагреваться в дневные часы до 70-80°С, а ночью сильно остывать.

Почвы другого состава, особенно при наличии влаги, нагреваются в дневные часы значительно меньше. Наличие растительности также уменьшает амплитуду колебаний температуры. Незначительные колебания температуры испытывают воздушные массы, расположенные над заболоченными территориями.

Ветер, мешающий застою воздушных масс в дневные и ночные часы, в значительной степени сказывается на уменьшении амплитуды колебаний температуры воздуха. Облака уменьшают прогрев земной поверхности в дневные и излучение в ночные часы, и тем самым уменьшают амплитуду колебаний температуры воздуха.

В целом суточная амплитуда температуры воздуха связана с целым рядом физико-географических факторов: широтой, долготой, высотой, рельефом, ветрами, с состоянием подстилающей поверхности, высотой наблюдения над поверхностью земли.

Годовой ход температуры воздуха определяется в первую очередь годовым изменением поступления солнечной радиации и непериодическим ходом атмосферных процессов, причиной которых является вторжение одних воздушных масс в область расположения других. В различных гидрологических расчетах для равнинных рек необходимо знать среднюю температуру в бассейне реки. Это температура рассчитывается по методу изотерм:

$$t = \frac{\sum f_i \cdot t_i}{\sum f_i}$$

где  $f$  - площадь между изотермами, проведенными в бассейне реки,  $t_i$  - средние годовые температуры между изотермами.

Большое влияние на формирование речного стока оказывает **температура почвы**. Основным источником получения тепла поверхностными слоями почвы, как и воздухом, является лучистая энергия Солнца. Нагретые поверхностные слои почвы передают тепло нижележащим слоям. Если потери тепла поверхностью почвы меньше его прихода, она нагревается, если больше – охлаждается. Чем больше положительная разность температуры поверхности почвы и на глубине, тем больше тепла поступает в почву, а при отрицательной разности – уходит из нее. Нагрев и охлаждение почвы зависят от теплопроводности почвы. С увеличением пористости теплопроводность уменьшается.

Нагрев и охлаждение почвы зависят от растительности. В дневное время растительный покров защищает почву от непосредственного воздействия солнечной радиации, от ее нагревания и, как следствие, уменьшает испарение с ее поверхности. В ночное же время растительный покров задерживает излучение тепла в атмосферу, препятствуя понижению температуры почвы, что вызывает увеличенное испарение с ее поверхности. Также большое значение в нагревании почвы имеет экспозиция склонов. Количество тепла, получаемого почвами бассейна реки, будет зависеть от экспозиции склонов в отношении сторон горизонта.

Почва, как и воздух, имеет суточный и годовой ход температуры. Воздух и почвы находятся в соприкосновении, поэтому их термический режим взаимообуславливается. Вместе с тем тепловые процессы, происходящие в этих различных по своим физическим свойствам массах, имеют как существенные различия, так и общие черты сходства. С удалением от земной поверхности, амплитуда изменений температуры почвы уменьшается. На глубинах 20-30 см температура почвы уже меняется мало, а на глубинах 8-10 м остается постоянной. Слой почвы с постоянной температурой на различных широтах лежит на разной глубине.

В тропических широтах, где годовая амплитуда температуры воздуха невелика, слой почвы с постоянной температурой лежит на глубинах 5-10 м, в умеренных и полярных широтах этой слой достигает глубины до 20м.

Почва может быть промерзшей, она может быть сухой и растрескавшейся, с выгоревшей на ней растительностью и т.д. Каждое такое состояние почвы по-разному влияет на поступление атмосферных осадков, выпадающих в бассейне реки, а, следовательно, и на сток, рек.

При отрицательных температурах почвы промерзают. Отсутствие снежного покрова усиливает промерзание. Снежный покров уменьшает колебание температуры почвы и замедляет промерзание почвы. Вода,

находящаяся в промерзших почвах и грунтах, превращается в лед, поэтому сток рек в зимнее время уменьшается, так как питание рек осуществляется в основном грунтовыми водами. Весной промерзшая водонепроницаемая почва увеличивает склоновый сток талых вод с поверхности бассейнов и речной сток увеличивается.

Надо отметить, что в почвах и грунтах вода большей частью находится в капиллярном состоянии, поэтому температура замерзания воды в почвах может понижаться до очень низких значений. При диаметре частиц  $d=1,57$  мм температура замерзания воды в почве –  $6,4^{\circ}\text{C}$ , при  $d=0,24$  мм  $t= -13,3^{\circ}\text{C}$ , при  $d=0,006$  мм  $t= -16,5^{\circ}\text{C}$ . Гравитационная вода, в почвах замерзает при температурах около –  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

*Атмосферные осадки*, выпадающие на поверхность бассейнов, являются основным источником влаги для стока и испарения. Воздух в нижних слоях теплее, также здесь, в воздухе, содержится много водяного пара. Водяной пар легче воздуха, что способствует образованию восходящих токов воздуха и конденсации влаги. Чем больше влаги в восходящих токах воздуха, тем интенсивнее происходит образование атмосферных осадков. Поэтому в циклонах с восходящими токами воздуха происходит обильное выпадение атмосферных осадков; в антициклонах с нисходящими токами их бывает мало.

Значительную роль при образовании атмосферных осадков играют ядра конденсации – мельчайшие твердые частицы, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии, обладающие гигроскопичностью и способностью конденсировать на себя водяные пары. Большой частью ядра конденсации образуются при извержении вулканов, песчаных и пылевых бурях. Огромная доля ядер конденсации состоит из частичек морской соли, которая попадает в атмосферу в виде мельчайших капель воды при отрыве частиц с гребней волн, и при процессах непрерывного лопания микроскопических пузырьков воздуха на поверхности океана, куда они непрерывно поднимаются из толщи вод. Вода с этих капелек быстро испаряется, и остаются мельчайшие, размером до  $0,00005$  мм, частицы соли, которые обладают большой гигроскопичностью и легко переносятся ветром вглубь материков, являясь существенным звеном в мировом круговороте вещества. Ядрами конденсации являются также мельчайшие отходы производств, продукты горения и т.д.

Мельчайшие капельки влаги при образовании заряжаются положительными или отрицательными зарядами. Капельки с разноименными зарядами притягиваются и сливаются. Увеличению размеров капелек

способствует также диффузный перенос частичек влаги, их столкновения и слияния, конденсационный и коагуляционный рост. Капли, сливаясь, приобретают значительные размеры и, преодолевая сопротивление восходящих токов воздуха, падают, увлекая за собой твердые частицы. Поэтому дождевая вода содержит примеси. По мере падения, в зависимости от условий влагосодержания в воздухе, капельки могут увеличиваться или, наоборот, даже испаряться, не достигая поверхности земли.

Атмосферные осадки играют исключительную роль в питании рек. Их количество, интенсивность выпадения, годовое распределение, их вид (твердые или жидкие) в значительной степени определяют режим рек.

Количество атмосферных осадков определяется их слоем в миллиметрах. Объем выпавших осадков в бассейне реки равен их слою на площадь бассейна:

$$V=x \cdot F$$

где  $V$  – объем в  $\text{м}^3$ ,  $x$  – слой атмосферных осадков (в м);  $F$  – площадь бассейна (в  $\text{м}^2$ ).

Интенсивностью выпадения атмосферных осадков  $i$  ( $\text{мм/мин}$ ) называют среднее количество атмосферных осадков в мм, выпадающих за 1 мин:

$$i = \frac{x}{T}$$

где  $T$  – продолжительность дождя в минутах,  $x$  – слой атмосферных осадков в миллиметрах.

Рельеф бассейна реки оказывает большое влияние на выпадение атмосферных осадков. Можно выделить две основные закономерности этого влияния. Первое, наветренные склоны гор получают большее количество атмосферных осадков, чем подветренные. Западные склоны Урала получают больше осадков, чем восточные. Подобное распределение атмосферных осадков наблюдается всюду, где существует относительная устойчивость в направлении движения воздушных потоков: западные склоны Северо-Американских Кордильер, Южно-Американских Анд, южные склоны Гималаев и т.д. И второе, с увеличением высоты местности количество атмосферных осадков увеличивается. Даже такая небольшая возвышенность, как Валдайская, получает 650-700 мм осадков в год, тогда как рядом расположенная котловина оз.Ильмень - 550 мм. В горных территориях увеличение количества выпадающих атмосферных осадков с высотой еще более значительно. В среднем градиент нарастания в году атмосферных осадков по высоте колеблется от 40 до 65 мм на 100 м. В формировании

режима стока рек большое значение имеет характер выпадения атмосферных осадков или его интенсивность. Ливневые осадки, или дожди с интенсивностью более 0,5 мм/мин, играют большую роль в жизни рек, особенно малых, так как они дают быстрое повышение их уровней и большой сток. Обложные осадки, то есть осадки с меньшей интенсивностью, но выпадающие относительно продолжительное время, в большой степени просачиваются в почву и нижележащие грунты, увеличивая долю грунтового питания.

Распределение атмосферных осадков по земной поверхности неравномерно, оно связано с рядом факторов, к наиболее важным из которых необходимо отнести удаленность от океанов и морей, направления движения воздушных масс или циркуляцию атмосферы, температуру подстилающей поверхности и воздуха, рельеф.

Особое значение в формировании речного стока играет **снежный покров**. При температуре воздуха ниже 0°С атмосферные осадки выпадают в виде сложных кристаллов, создавая снежный покров. Образование кристаллов происходит в верхних холодных слоях атмосферы за счет охлаждения водяных паров и сублимации, кристаллы, соединяясь в различные формы, выпадают на поверхность земли.

По времени залегания снежного покрова различают сезоны: предзимье - до устойчивого постоянного снежного покрова; зимний - с устойчивым покровом; послезимье - при таянии снега весной, с временным снежным покровом. Снежный покров называют сезонным, если снег за теплое время года успевает растаять. В районах с низкими температурами воздуха в летнее время и там, где снега выпадает много, образуется постоянный снежный покров. В горных районах, в зависимости от высоты бассейна, есть районы как с постоянным снежным покровом, так и с сезонным.

Снежный покров характеризуется мощностью и плотностью. Мощность снежного покрова выражается в см и, в зависимости от физико-географических условий, может меняться от нескольких сантиметров до нескольких метров, в частности, в горных областях. Плотность снега зависит от его структуры. Снег северных районов, где оттепелей не бывает, сильно отличается от снега южных районов. Различают следующие структурные виды снега, отличающиеся размерами снежинок и плотностью: пушистый, белый; мелкозернистый, белесовато-серого цвета; среднезернистый, сероватого цвета; крупнозернистый, голубовато-серого цвета; метелевый, белый с окатанными снежинками; игольчатый, из тонких ледяных игл. Также различают особые виды снега: крупа, иней, изморозь, гололед, град и др.

Плотность снега измеряется отношением веса снега к его объему. Она обычно бывает от  $0,1\text{г/см}^3$  до  $0,4\text{г/см}^3$ . Свежевыпавший снег может иметь плотность много меньше  $0,1\text{г/см}^3$ , а очень плотный свыше  $0,5\text{ г/см}^3$ .

Снежный покров защищает почву от промерзания, и под ним нередко находятся зеленые растения, а почва при этом сохраняет свои инфильтрационные свойства. В этом случае при таянии снега, значительная часть воды уходит на просачивание. Температура почвы под снегом также зависит от изменения атмосферного давления. Снег, являясь хорошим изолятором, задерживает поток тепла в атмосферу, а холодный воздух с ростом атмосферного давления легче проникает в почву и охлаждает ее.

Как уже отмечалось, снежный покров в бассейнах рек залегает неравномерно. Это зависит, главным образом, от рельефа, характера растительного покрова, силы и направления ветров. В бассейнах рек с расчлененным рельефом, лишенным лесов, в оврагах, балках, глубоких долинах скапливаются значительные массы снега. Нередко высота слоя снега достигает нескольких метров, тогда как на равнинных участках снега может не быть. Снесенный в овраги и балки снег лежит большее время, чем на равнинах, давая длительное питание рекам.

Распределение снега в бассейне реки во многом зависит от расположения бассейна по отношению к направлениям зимних ветров, переносящих снег. Как правило, на наветренных склонах бассейнов рек и на невысоких водоразделах, лишенных растительности, снега бывает меньше, чем на подветренных склонах.

В лесу высота снежного покрова наблюдается большая, чем в поле, однако плотность обычно бывает меньше. Поэтому запасы воды в лесу могут оказаться меньше, чем в поле. Кроме того, в лесу значительная доля снега задерживается кронами деревьев, откуда он быстрее испаряется. При этом таяние снега в лесу происходит медленнее. Снег там сохраняется дольше, продолжая питать реки.

При больших запасах снега в бассейне, склоновый сток достигает значительных размеров, увеличивая интенсивность эрозионных процессов.

Рассмотрим вторую группу физико-географических факторов формирования речного стока.

**Рельеф** земной поверхности во всем многообразии его форм, условий формирования и других физико- географических особенностей является одним из главных факторов, влияющих на гидрометеорологические процессы, в том числе на речной сток.

Поверхность земли влияет на состояние атмосферы и вод суши как степенью горизонтального и вертикального расчленения, высотой над уровнем моря, так и характером элементов рельефа и их свойств.

Рельеф в значительной степени влияет на климат, который оказывает огромное влияние на эволюцию рельефа и отдельных его форм.

В гидрологии рельеф приобретает особое значение при изучении характера речного стока, развития и густоты речной сети, развития речных долин, уклонов водной поверхности реки и дна русла, длины реки и ее извилистости, прогревания и промерзания почвы, температуры приземного слоя воздуха, снежного покрова и др. Рельеф бассейна оказывает существенное влияние на распределение атмосферных осадков, испарение, характер растительного покрова, а тем самым на климат и сток реки.

По условиям формирования стока выделяются рельефы: горный, предгорный и равнинный. Горный рельеф характеризуется большой крутизной склонов, расчлененностью, узкими долинами с большим падением и сильной денудацией. Вследствие крутых склонов и малой ширины бассейна, сток осадков происходит быстро, при этом потери на испарение и просачивание невелики. Предгорный рельеф более пологий, но так же как, и горный, сильно расчленен и денудирован. Долины более широкие, уклоны меньше. Это способствует некоторому замедлению стока и его уменьшению за счет потерь на испарение и просачивание. Равнинный рельеф способствует образованию широких извилистых долин. Сток атмосферных осадков при этом задерживается, увеличивается испарение и просачивание, а тем самым уменьшается поверхностный сток. В равнинном рельефе, при развитии овражно-балочной сети, в зимнее время происходит значительное накопление снега, сдуваемого с прилегающих равнин, что задерживает его таяние и регулирует сток.

Почвы и грунты оказывают влияние на формирование речного стока через инфильтрацию, водопроницаемость, влагоемкость, водоотдачу и другие свойства. Многообразие физико-географических условий бассейна реки обуславливает большое разнообразие почв. Это связано с геологическими породами, из которых образуются почвы, с особенностями рельефа, климата, развитием различных видов растительности, микроорганизмов, животных и деятельностью человека. Наибольшее влияние на образование почв оказывает климат и растения. Еще В.В. Докучаев отметил климатическую зональность почв и закономерность в ее чередовании. Каждой климатической зоне свойственна соответствующая растительность, поэтому и почвы залегают отдельными полосами – зонами.

Величина потерь на инфильтрацию зависит от коэффициента инфильтрации почв, то есть способности почв пропускать через свою толщу воду и ее удерживать. Эти свойства почвы зависят как от ее механического состава, так и от ее физических характеристик – структурности, пористости, скважности, водопроницаемости, а также от растительного покрова и обработки почвы.

Под пористостью почв понимают наличие мелких капиллярных промежутков, пустот, в которых инфильтрация может достигать значительных размеров. Общая пористость почв определяется отношением объема всех пустот к общему ее объему, выраженному в процентах.

Под скважностью почв понимают наличие в них сравнительно больших пустот, мелких трещин. При наличии глубоких трещин от высыхания на поверхности почвы происходит уже не инфильтрация, а инфлюация – втекание. Такие почвы легко переводят атмосферные осадки в грунтовые воды.

Способность почв пропускать через себя воду называется водопроницаемостью. Она зависит как от количества пустот в почве, так и от их размеров. Так глина, имеющая пористость до 40% обладает очень низкой водопроницаемостью. Гравий же, обладающий такой же пористостью, имеет высокую проницаемость. Благодаря свойству водопроницаемости почв в бассейнах происходит накопление грунтовых вод, регулирующих сток рек. В засушливые периоды грунтовые воды пополняют сток рек.

Проницаемые почвы в бассейнах рек инфильтрируют часть талых и ливневых вод, переводя их в грунтовые и уменьшая тем самым половодья и паводки. При непроницаемых почвах склоновый сток велик, половодья и паводки развиваются быстро и достигают значительных размеров.

Растительный покров, леса оказывают существенное влияние на режим рек. Растительный покров задерживает значительную часть атмосферных осадков, которые не доходят до поверхности почв. Весьма велики потери атмосферных осадков на растительном покрове при малом количестве осадков. Различные виды растений по-разному задерживают жидкие атмосферные осадки и снег. К примеру, хвойные растения задерживают значительное количество снега, увеличивая площадь испарения, которое идет не только с поверхности снега, лежащего на земле, но и лежащего на ветках. Количество задерживаемой лесом влаги зависит от возраста и густоты леса, характера и величины годовых атмосферных осадков и т.д.

Лес также снижает испарения, уменьшая скорость ветра. Сокращение площади лесов отрицательно сказывается на речном стоке, уменьшая его.

Итак, влияние леса на сток очень велико. В лесу уменьшается испарение, поверхностный сток в лесу либо отсутствует, либо во много раз меньше стока с открытых пространств, лес уменьшает сток с прилегающих к нему безлесных участков, поглощает сток, поступающий с безлесных участков, расположенных выше по склону, лес предохраняет снег от сдувания его в овраги, а также от таяния его во время оттепелей.

В целом можно считать, что с увеличением лесистости в одном и том же физико-географическом районе минимальные расходы рек увеличиваются, а максимальные расходы наоборот снижаются.

Сохранение лесов, соблюдение правила лесозаготовок - залог сохранения устойчивого водного режима и стока рек.

### **Водный баланс**

#### Водный баланс земного шара.

Схема круговорота воды может быть выражена уравнением водного баланса, которое определяет связь между приходом и расходом влаги для всего земного шара. Приходная часть баланса – осадки, расходная – испарение и сток.

Примем следующие обозначения:

$E_m$  – объем воды, испаряющейся за год с морей и океанов в среднем за многолетний период;

$E_c$  – объем воды, испаряющейся за год с поверхности суши в среднем за многолетний период;

$X_m$  – среднемноголетний объем осадков, выпадающих за год на поверхность морей и океанов;

$X_c$  – среднемноголетний объем осадков, выпадающих за год на поверхность суши;

$Y$  – объем воды, стекающей за год с суши в моря и океаны.

Ежегодно с поверхности морей и океанов испаряется количество воды, равное количеству выпадающему на них осадков плюс речной сток, то есть

$$E_m = X_m + Y$$

С поверхности суши в среднем за год испаряется столько воды, сколько выпадает на неё осадков, за вычетом воды, стекающей в моря и океаны:

$$E_c = X_c - Y.$$

Объединив два этих уравнения, получим общее уравнение водного баланса земного шара в виде

$$E_m + E_c = X_m + X_c$$

Уравнение показывает, что объем воды, испаряющейся за год с морей, океанов и суши, равен годовому объему осадков, выпадающих на их поверхность.

### Водный баланс речного бассейна

Речным бассейном называется территория, с которой вода стекает по поверхности земли только в данную реку.

Уравнение водного баланса отдельного речного бассейна для любого года имеет вид

$$x + q = E + y + r \pm \Delta w,$$

где  $x$  – объем годовых осадков на поверхность бассейна;

$q$  – объем подземных вод, притекающих из соседних бассейнов;

$E$  – объем испарения с поверхности бассейна;

$y$  – объем годового стока реки;

$r$  – объем подземных вод, оттекающих в соседние бассейны;

$\Delta w$  – изменение запаса грунтовых вод в бассейне.

Членами  $q$  и  $r$ , ввиду их незначительной величины, обычно пренебрегают.

В годы с большим количеством осадков запас грунтовых вод в бассейне увеличивается, и  $\Delta w$  учитывается со знаком плюс. В засушливые годы  $\Delta w$  имеет знак минус. Для многолетнего периода, в течение которого многоводные годы чередуются с маловодными,  $\Delta w$  можно не учитывать. Уравнение водного баланса речного бассейна принимает при этом более простой вид

$$x_0 = y_0 + E_0,$$

где  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $E_0$  – среднееголетние объемы годовых осадков, стока и испарения.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 9 Минимальные расходы воды. Речные наносы, их образование.

**Минимальным стоком** называется сток, который проходит в реках в летне-осеннюю и зимнюю межень, когда река переходит на грунтовое питание, а поверхностный сток прекращается.

*Минимальный сток* – наименьший по величине сток, обычно наблюдающийся в межень. Периодом минимального стока называют отрезок времени от 1 до 30 суток внутри меженного периода, когда наблюдаются наименьшие расходы воды. Опорные характеристики минимального стока – минимальные среднесуточные расходы воды и минимальные 30-дневные расходы. Последние представляют собой средний расход за 30 суток внутри летне-осенней или зимней межени (рассматриваются отдельно) с наиболее низким стоком. Введение в практику гидрологических и водохозяйственных расчетов минимального 30-дневного расхода вместо минимального среднемесячного вызвано необходимостью исключить влияние календарных месяцев, завышавших оценки низкого стока в условиях прерывистой межени. В зависимости от целей водохозяйственных расчетов применяются также величины 7 и 10-дневных минимальных расходов воды. Большое значение имеет определение этих характеристик при назначении минимально допустимых расходов воды, оставляемых в реках при осуществлении водозабора и устройства водохранилищ, расчета предельных величин сбросных расходов воды. Основное применение в практике водохозяйственного и строительного проектирования находят величины минимального стока большой обеспеченности в диапазоне 75–97%, характеризующие годы с маловодной меженью сравнительно редкой повторяемости. При оценке наихудших условий для формирования качества воды обычно используется минимальный сток 95%-ной обеспеченности (средняя повторяемость 1 раз в 20 лет), что является достаточно произвольным условием, требующим дифференциации в зависимости от тяжести негативных экологических и санитарно-технических последствий.

Различают характеристики минимального стока:

- *суточные минимальные расходы воды* с разделением их на летние и зимние за каждый год;
- *среднемесячные минимальные расходы воды* с разделением их на летние и зимние за каждый год;
- средние многолетние значения (*нормы*) суточных минимальных расходов воды;

- средние многолетние значения (**нормы**) среднемесячных минимальных расходов воды;
- **минимумы** различной обеспеченности;
- **абсолютные минимумы** – наименьший расход воды за весь многолетний период наблюдений.

Для определения расчетного минимального расхода используют данные наблюдений по стоку за зимний и летне-осенний периоды. Расчет ведут

- по среднемесячным расходам,
- по средним расходам за 30 суток с наименьшим стоком,
- по среднесуточным расходам.

*Среднемесячные расходы* рекомендуется использовать для расчета в том случае, когда межень период продолжительный и устойчивый (длится не менее двух месяцев и в течение этого времени на реке нет паводков).

Минимальные расходы, *средние за 30 суток*, с наименьшим стоком используются при короткой и прерывистой межени. Короткой считают межень продолжительностью меньше двух месяцев; прерывистой – если она прерывается паводками.

Минимальный *30-суточный некалендарный* сток определяется путем построения гидрографов стока исследуемой реки по годам за весь период наблюдений, на которых выделяется участок продолжительностью 30 суток с наименьшими расходами воды, и по таблице ежедневных расходов воды производят подсчет среднего расхода воды за выбранный период (рисунок). Минимальные 30-суточные расходы воды всегда меньше или равны среднемесячным календарным расходам воды

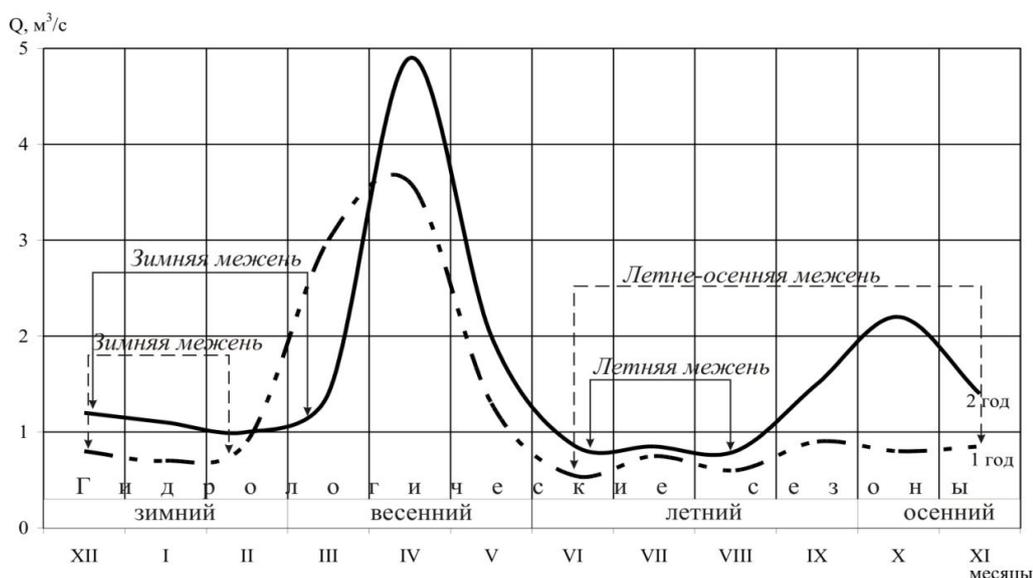


Рисунок – Типовой гидрограф и гидрологические сезоны на реках Беларуси

При использовании водных ресурсов в маловодный период большое значение имеет оценка критического, или так называемого *лимитирующего стока*, т. е. расходов воды за маловодный сезон (или сезоны), в который водное хозяйство испытывает наибольшую нужду в воде или наибольшие трудности с водоснабжением. Это понятие имеет смысл при сопоставлении естественных водных ресурсов с потребностями в них народного хозяйства. Те периоды времени, в течение которых возможны длительные перебои в обеспечении водой хозяйственных мероприятий, относятся к категории лимитирующих.

### **Происхождение, характеристики и классификация речных наносов.**

Вода, стекающая по земной поверхности, под действием силы тяжести непрерывно производит работу. Количество этой работы (энергия потока) зависит от массы стекающей воды и падения реки в пределах рассматриваемого участка.

Большая часть энергии потока расходуется на преодоление внутреннего сопротивления движению воды, возникающего вследствие трения частиц между собой. Остальная, меньшая часть энергии потока, тратится на перемещение (транспорт) продуктов размыва с более повышенных мест бассейна в более пониженные.

Таким образом, этой энергией обуславливаются все процессы денудации, а именно: 1) смыв частиц грунта с поверхности (эрозия); 2) перенос (транспорт) частиц вниз по течению; 3) аккумуляция (отложение) частиц.

Денудацией (обнажение) называется совокупность процессов (водой, ветром, льдом, непосредственным действием силы тяжести) разрушения горных пород на поверхности Земли и переноса продуктов разрушения в пониженные участки, где происходит их накопление.

В верховых участках реки, где скорость течения значительна, эрозия (денудация) преобладает над аккумуляцией (отложением наносов) и русло реки постепенно углубляется. При этом размыв русла в глубину (глубинная эрозия) преобладает над размывом русла в плане (боковая эрозия).

В среднем течении процессы эрозии и аккумуляции взаимно уравновешиваются, вследствие чего продольный профиль реки на этом участке обычно находится в состоянии равновесия.

В низовом участке реки аккумуляция преобладает над эрозией, обуславливая постепенное повышение дна русла. Русловой процесс здесь проявляется в форме боковой эрозии. Подъем дна русла в нижнем течении

вследствие речных отложений у рек, несущих большое количество наносов, может быть весьма значительным. На горных реках, выходящих на равнину, формируются конусы выноса (дельты).

Характер, интенсивность и направленность эрозионно-аккумулятивных процессов тесно связаны с физико-географическими условиями: особенностями климата, гидрологического режима реки, рельефа, почв, растительности, водосбора и др., а также хозяйственной деятельностью.

*Климат* (величина атмосферных осадков, интенсивность дождей и снеготаяния, температура и влажность воздуха) определяет количество, интенсивность и распределение осадков по площади водосбора и во времени, а также водность и режим потоков, которые приводят к смыву и транспорту твердых частиц вниз по течению.

*Рельеф* способствует усилению или ослаблению скорости течения движущейся по поверхности водосбора воды, а следовательно, и усилению или ослаблению размыва.

*Почвы*, являясь объектом эрозии, содержат материал размыва и смыва, поступающий в русловую сеть. Но в то же время они оказывают влияние на интенсивность движения воды, уменьшая в различной степени (в зависимости от водно-физических свойств, эрозионной устойчивости) количество движущейся по поверхности воды за счет просачивания и создавая различное сопротивление ее движению, что в конечном итоге сказывается и на формах русловых образований.

*Растительный покров*, увеличивая своей корневой системой связность почв, тем самым препятствует интенсивному развитию эрозионных процессов и предохраняет поверхность почвы от разрушения. Уничтожение естественного растительного покрова путем распашки поверхности водосбора или иными средствами, если оно проводится бессистемно и без должной борьбы за сохранение почвенного покрова, приводит к смыву плодородного почвенного слоя.

Основными видами *хозяйственной деятельности*, влияющими на эрозионно-аккумулятивные процессы, являются: дноуглубительные работы в целях поддержания судоходных глубин; гидротехническое строительство (водохранилища, водозаборы); строительство переходов через реки (мосты, трубопроводы, ЛЭП); сведение лесов и распашка склонов; орошение и осушение земель и другие мероприятия на водосборах и в руслах рек.

*Речные наносы* – твердые минеральные частицы, переносимые водным потоком и формирующие русловые и пойменные отложения.

Они образуются из продуктов денудации горных пород и эрозии почв.

Главными источниками поступления наносов в реки служат поверхность водосборов, подвергающаяся эрозии в период дождей и снеготаяния, и сами русла рек, размываемые речным потоком.

Эрозия поверхности водосборов (и поступление ее продуктов в реки) обычно тем больше, чем сильнее дожди и интенсивнее снеготаяние, чем больше неровности рельефа, рыхлее грунты (наиболее легко подвергаются эрозии лёссовые грунты), менее развит растительный покров, сильнее распаханность склонов.

В зависимости от характера движения в водном потоке речные наносы подразделяются на *взвешенные* и *донные (влекомые)*.

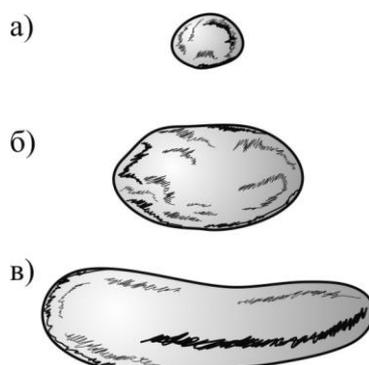
В зависимости от крупности наносов и скорости течения твердые частицы могут находиться во взвешенном состоянии или перемещаться по дну русла. Значительная часть взвешенных наносов является транзитной и переносится течением по руслу реки до ее устья.

Большая же часть донных наносов задерживается на отдельных участках реки и принимает участие в формировании русла.

Наиболее важными характеристиками речных наносов являются: гранулометрический состав, средняя геометрическая крупность, удельный вес (плотность), гидравлическая крупность.

**Гранулометрический состав** – распределение наносов по размерам частиц (фракциям). При этом принята следующая шкала (в мм): глина < 0,001; ил – 0,001–0,01; пыль – 0,01–0,1; песок – 0,1–1,0; гравий – 1,0–10; галька – 10–100; валуны > 100.

По своей форме частицы наносов делятся на шарообразные (а), эллипсоидальные (б) и уплощенные, или пластинчатые (в). Частицы песка и мелкого гравия имеют шарообразную форму, среди частиц среднего и крупного гравия встречается много эллипсоидальных. Частицы гальки обычно уплощенные.



**Средняя геометрическая крупность** ( $d_{cp}$ ), или средневзвешенный диаметр частиц, рассчитывается по формуле

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i P_i}{n},$$

где  $d_{cp}$  – средний диаметр частиц;  $d_i$  – диаметр  $i$ -й фракции;  $P_i$  – вес данной фракции в процентах от общего веса фракции,  $n$  – число фракций.

**Удельный вес**  $g$  – вес частицы в единице объема ( $г/см^3$ ); для речных наносов изменяется в узких пределах и обычно принимается равным  $2,65 г/см^3$ .

**Гидравлическая крупность**  $w$  – скорость осаждения частиц в неподвижной воде ( $мм/с$ ). Она зависит от диаметра частиц и температуры воды.

Вязкость воды связана обратной зависимостью с температурой. Поэтому ранней весной и осенью, когда температура воды низка, а ее вязкость относительно велика, падающие в воде мелкие твердые частицы испытывают большее сопротивление движению и, следовательно, имеют меньшую гидравлическую крупность, чем летом.

**Гидравлическая крупность частиц при температуре воды 15 °С**  
(по А. В. Караушеву)

Диаметр частиц $d$ , мм	1,0	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01	0,005	0,001
Гидравлическая крупность $w$ , мм/с	100	60	21	8	2	0,08	0,03	0,0008

### **Движение влекомых наносов. Закон Эри.**

Донные (влекомые) наносы – твердые частицы (песок, гравий, галька, валуны), перемещаемые потоком в придонном слое путем влечения или перекачивания, а чаще путем перебрасывания на относительно короткие расстояния (сальтация). В некоторых случаях эти наносы могут выбрасываться восходящими вихревыми токами на большую высоту, даже достигать поверхности потока.

С изменением гидравлических характеристик потока (глубина, скорость течения, уклоны и др.) в речном потоке наносы могут переходить из донных во взвешенные, и наоборот.

Как показывают наблюдения, на реках, донные наносы в руслах не имеют ровной плоской поверхности, а образуют рельеф дна в виде грядовых скоплений, следующих друг за другом. Образование гряд является

следствием взаимодействия турбулентного водного потока с легкоподвижным сыпучим материалом, выстилающим ложе реки.

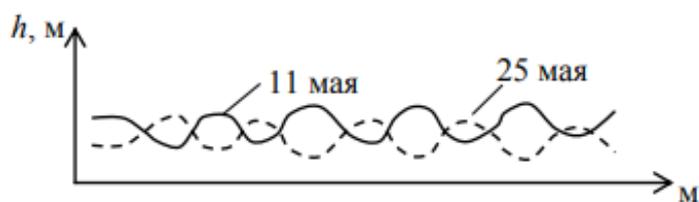


Рисунок Смещение гряды по времени

При турбулентном режиме течения наблюдаются пульсации скорости. Перемещение наносов также носит пульсирующий характер

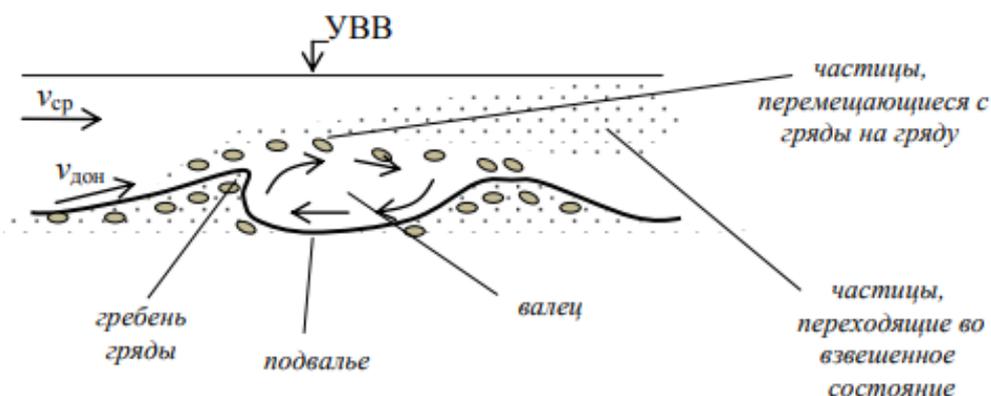


Рисунок Механизм перемещения наносов

Скорость перемещения грядовых скоплений наносов во много раз меньше скорости потока воды. Чем больше размеры гряд, чем крупнее наносы, из которых сложены гряды, тем медленнее их поступательное движение.

Крупность влекаемых наносов изменяется по сезонам года, возрастая при паводках и уменьшаясь в межень. При больших скоростях течения донные наносы движутся большими массами. Размеры донных наносов постепенно уменьшаются по длине рек с уменьшением скоростей вниз по течению.

Количество *влекаемых наносов* в равнинных реках мало. В условиях Беларуси доля донных наносов в общем стоке наносов реки (твердом стоке) составляет от 5 % в больших реках до 10 % в малых. Значительная часть донных наносов рек Беларуси входит в состав донных отложений и участвует в образовании русловых аккумулятивных форм – донных гряд, кос, побочней.

Влечение частиц по дну обуславливается донной скоростью потока и размерами частицы. Эта закономерность отражена в законе Эри (формуле Эри):

$$P = Av^6$$

где  $P$  – вес частицы, влекаемой потоком;  $A$  – коэффициент, зависящий от формы и удельного веса частицы;  $v$  – скорость, при которой эти частицы начинают двигаться.

Эта формула получила название *закона Эри*, утверждающего, что вес влекаемых наносов пропорционален шестой степени скорости течения.

Формула Эри показывает, что если скорость потока увеличится в 3 раза, то вес частицы, передвигающейся при этой скорости, увеличится в 729 раз. Вот почему на равнинных реках донные наносы состоят преимущественно из песка различной крупности, горные же реки переносят гравий, гальку, крупные валуны.

Для перемещения по дну песка необходимы придонные скорости течения не менее 0,10–0,15 м/с, гравия – не менее 0,15–0,5, гальки – 0,5–1,6, валунов – 1,6–5 м/с. Средняя скорость потока должна быть еще больше.

### **Движение и сток взвешенных наносов**

*Взвешенные наносы* – твердые частицы, переносимые потоком во взвешенном состоянии. Взвешивание осуществляется в турбулентных потоках под влиянием восходящих пульсационных вихревых токов. Вихри, возникающие в придонном слое, захватывают частицы наносов и поднимают их в толщу потока. Частицы, вовлеченные внутрь потока, движутся вместе с водой, находясь под воздействием переменных по величине и направлению *пульсационных скоростей*.

На турбулентный перенос накладывается явление падения частиц под действием силы тяжести. В результате возникает сложный характер движения частиц. В процессе вертикального движения частица может опуститься до дна и смешаться с донными отложениями, оставаясь в них до момента, когда над ней вновь пройдет достаточно мощный вихрь и вновь увлечет ее в толщу потока.

Таким образом, твердые частицы могут находиться во взвешенном состоянии в том случае, когда вертикальная составляющая скорости течения превосходит гидравлическую крупность. При обратном соотношении частицы будут осаждаться на дно и начнется аккумуляция наносов или влечение их по дну. Вертикальная составляющая скорости растет с увеличением степени турбулентности потока и, следовательно, с увеличением скорости течения.

Таким образом, чем больше скорости, тем более крупные частицы находятся во взвешенном состоянии. По мере продвижения вниз по течению в связи с уменьшением его скорости размеры частиц, находящихся во

взвешенном состоянии, будут уменьшаться, а аккумуляция наносов – усиливаться.

Важнейшей характеристикой при движении взвешенных наносов в реках является мутность воды ( $\rho$ ) – количество взвешенных веществ, содержащихся в единице объема воды ( $\text{г/м}^3$ ).

Мутность значительно меняется по живому сечению потока и во времени. Как правило, мутность возрастает от поверхности ко дну. Это увеличение происходит главным образом за счет крупных фракций наносов, увеличивающихся ко дну. Мелкие же фракции распределяются довольно равномерно по глубине потока. С увеличением водности, скорости и турбулентности потока распределение взвешенных наносов по вертикали становится более равномерным. По ширине реки мутность несколько возрастает к середине потока, но сильно меняется в зависимости от направления и циркуляции течений, впадения притоков, несущих различное количество наносов, чем главная река, и т. д. В период повышенной водности мутность воды возрастает.

В настоящее время в Беларуси систематические наблюдения за мутностью воды и стоком взвешенных наносов ведутся на 12 водпостах. Пробы отбираются батометром-бутылкой (рис. 6.1) интегральным (в двух точках – 0,2h и 0,8h) или точечным (в одной точке – 0,6h) методами.

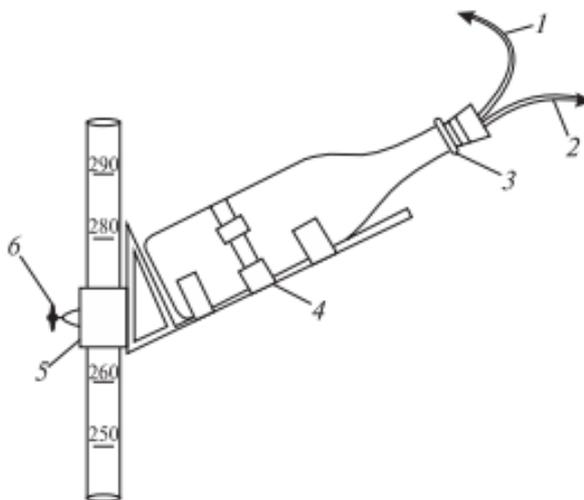


Рисунок. Батометр-бутылка ГГИ (Государственный гидрологический институт) с креплением на штанге:

- 1 – воздухоотводящая трубка; 2 – водозаборная трубка; 3 – металлическая головка; 4 – обойма; 5 – муфта для штанги; 6 – зажимной винт

Территория Беларуси отличается небольшой средней годовой мутностью рек. На территории республики можно выделить две зоны мутности: малой (до  $25 \text{ г/м}^3$ ) и повышенной (от  $25$  до  $50 \text{ г/м}^3$ ).

К зоне малой мутности (с равнинным рельефом) относятся бассейны рек Припять, Березина, нижние части бассейнов рек Западная Двина, Днепр и Сож. К зоне повышенной мутности (с возвышенным рельефом) относятся бассейны рек Неман и Виляя, верхние части бассейнов Западной Двины и Днепра. Мутность во время весеннего половодья в среднем по Беларуси примерно в 1,5 раза выше ее средних годовых величин.

Важнейшими характеристиками движения взвешенных наносов в реках, кроме мутности, являются расход, модуль и объем стока взвешенных наносов, определяемые по следующим формулам.

*Расход взвешенных наносов* – количество наносов, проносимое потоком через поперечное живое сечение реки в единицу времени:

$$R = \rho Q \cdot 10^3,$$

где  $R$  – расход взвешенных наносов, кг/с;  $\rho$  – мутность воды, г/м<sup>3</sup>;  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с.

*Сток взвешенных наносов* – количество наносов, проносимых потоком через поперечное живое сечение в единицу времени (например, в год):

$$\sum R = RT,$$

где  $\sum R$  – годовой сток взвешенных наносов, тыс. т;  $R$  – расход взвешенных наносов, кг/с;  $T$  – количество секунд в году, 31,56 млн.

*Модуль стока взвешенных наносов* – сток наносов в единицу времени (например, в год) с единицы площади (км<sup>2</sup>):

$$M_R = \sum R \cdot 10^3 / F,$$

где  $M_R$  – средний годовой модуль стока взвешенных наносов, т/км<sup>2</sup>;  $\sum R$  – годовой сток взвешенных наносов, тыс. т;  $F$  – площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

### **Селевые паводки**

В горных районах на небольших реках часто возникают кратковременные паводки, несущие огромные скопления наносов. Эти скопления твердого материала придают потоку характер грязевого, грязе-каменного или водно-каменного. Потоки эти называются селями.

Селевой поток (сель) — это бурный временный горный поток, состоящий из смеси воды и большого количества обломков горных пород (от глинистых частиц до крупных камней и глыб), которые составляют от 10 до 75% объема движущейся массы

Образуются сели в результате выпадения интенсивных дождей, реже – интенсивного снеготаяния. Во время их прохождения происходят интенсивные процессы размыва русла и отложения наносов.

Селевые потоки относятся к особо опасным явлениям природы. Они обладают колоссальной силой и могут разрушать гидротехнические сооружения, здания и мосты, сносить под откос целые железнодорожные составы.

#### **Основные характеристики селей:**

1. фронт достигает в высоту от 5 до 25 м
2. длительность – до 3 часов
3. длина селевого русла – от 10 м до десятков километров
4. ширина – от 3 до 100 м
5. скорость перемещения – до 35 км/ч, в среднем 18 км/ч
6. минеральные включения составляют до 60% объема
7. переносимые валуны могут достигать 4 м в диаметре, весить до 300 т

Сель может внезапно остановиться. Обычно это происходит, если грунтовой воды недостаточно, если уменьшилась скорость течения реки, либо если изменилась крутизна склона.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 10 Режим речного стока.

### Фазы водного режима.

**Водным режимом** называется изменение во времени уровней, расходов и объёмов воды в водных объектах.

В водном режиме рек наблюдается несколько характерных фаз, повторяющихся из года в год и обусловливаемых видом питания реки.

Под **фазами водного режима** рек понимают характерные состояния водного режима реки, повторяющиеся в определённые гидрологические сезоны в связи с изменением условий питания. Основными фазами водного режима реки являются половодье, паводок и межень.

**Половодье** — фаза водного режима реки, ежегодно повторяющаяся в данных климатических условиях в один и тот же сезон, характеризующаяся наибольшей водностью, высоким и длительным подъемом уровня воды и вызываемая снеготаянием или совместным таянием снега и ледников. Различают половодье весеннее, весенне-летнее и летнее. Половодье формируется как талыми снеговыми, так и дождевыми водами. Таяние снега на равнинах вызывает весеннее половодье, таяние высокогорных снегов и ледников, а также выпадение длительных и сильных летних дождей (например, в условиях муссонного и тропического климата) – половодье в теплую часть года (т. е. весенне-летнее или летнее половодье). Половодье, особенно обусловленное дождями, нередко имеет многовершинную форму.

**Паводок** – это фаза водного режима, которая может многократно повторяться в различные сезоны года и характеризуется интенсивным, обычно кратковременным увеличением расходов и уровней воды и вызывается дождями или снеготаянием во время оттепелей. В отдельных случаях расход воды во время паводка может превышать расход воды половодья, в особенности на малых реках.

В половодья (как весеннее, так и летнее) часто происходит заливание речной поймы. За исключением катастрофических случаев, заливание поймы – событие обычное, регулярное и поэтому не может быть неожиданным для населения и хозяйства. В отличие от половодья паводки обычно менее регулярны и трудно предсказуемы. Поэтому именно неожиданные дождевые паводки и приводят нередко к катастрофическим последствиям.

**Межень** – период малой водности и низких уровней воды во время сухой или морозной погоды, когда река питается лишь грунтовыми водами. Различают летнюю и зимнюю межень.

К летней межени относят период от конца половодья до осенних паводков, а при их отсутствии до начала зимнего периода. Зимняя межень совпадает обычно с периодом ледостава.

В зоне избыточного увлажнения реки обычно имеют устойчивое грунтовое питание, обеспечивающее достаточно большой сток летней межени. Зимой же малые реки в этих зонах могут иногда *промерзнуть* до дна. Сток у таких рек в зимнюю межень меньше, чем в летнюю. В зоне недостаточного увлажнения, наоборот, реки в летнюю межень обычно имеют меньший сток, чем в зимнюю межень. Малые реки в этой зоне в летнюю межень могут даже *пересыхать*.

### **Понятие гидрографа стока. Типы питания рек.**

**Гидрограф стока** – хронологический график изменения расходов воды в течение года или сезона в данном конкретном створе водотока. При гидрологических расчетах обычно оперируют типовым гидрографом стока, т.е. гидрографом, отражающим общие черты гидрографов за ряд лет. Установление закономерностей в распределении стока внутри года имеет важное практическое значение для различных водохозяйственных целей, например, для определения основных параметров водохранилищ и гидротехнических сооружений.

С помощью расчленения гидрографа выделяют типы питания речного стока (дождевое; - снеговое; - ледниковое; - подземное; - смешанное).

Характер питания реки отражается на гидрографе – графике зависимости уровня воды от времени  $H=N(t)$ .

**1. Дождевое питание** - поступление в водный объект поверхностных и грунтовых вод, обусловленное выпадением атмосферных осадков в виде дождей. ДП происходит периодически, с перерывами и вызывает значительные колебания уровня воды.

Каждый дождь характеризуется слоем выпавших осадков (мм), продолжительностью (минуты, часы, сутки), интенсивностью выпадения (мм/мин, мм/ч) и площадью распространения (км<sup>2</sup>). В зависимости от этих характеристик дожди можно подразделить, например, на ливни и обложные.

Ливни захватывают небольшие по площади территории и дают одиночную паводковую волну, проходящую по реке, в бассейне которой проходил ливень. Заметное повышение уровня воды ливни вызывают на реках с небольшими по площади бассейнами. Если ливни часто выпадают в разных частях бассейна, то сложение ливневых паводков даёт ливневое половодье.

Такие ливневые половодья наблюдаются на Амуре. Гидрограф реки с преобладающим ливневым питанием представлен на рисунке.

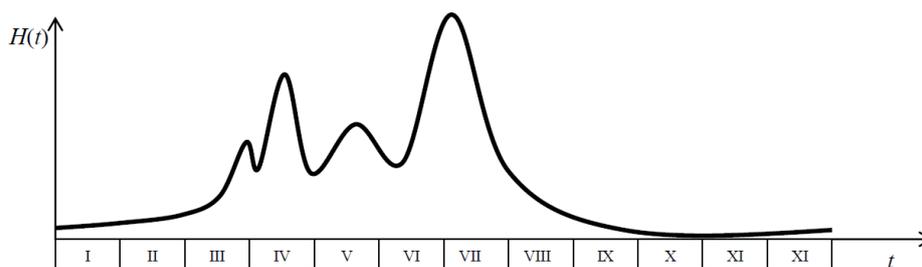


Рисунок. Дождевое питание

Из графика видно, что в теплый период года наблюдается несколько волн паводка. На гидрографе наблюдается несколько пиков с крутыми ветвями подъема и спада.

**2. Снеговое питание.** Снеговое питание характерно для рек, располагающихся в тех районах, где устойчивые морозные снежные зимы. СП является вторым по важности типом питания рек, особенно в условиях умеренного климата. Снежный покров, накапливающийся на площади бассейна, даёт весьма существенную долю в питании большого количества рек. У рек со снеговым питанием гидрограф имеет один чётко выраженный максимум с медленным подъёмом и растянутым во времени спадом уровней. Такой тип питания свойственен равнинным рекам.

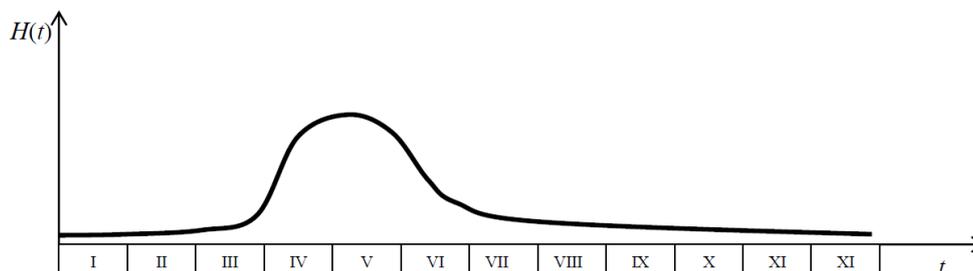


Рисунок. Снеговое питание

В зависимости от плотности и толщины снежного покрова снег при таянии может давать разные слои воды. Снеговые запасы воды определяют с помощью снегомерных съёмок. Запасы воды в снеге напрямую зависят от зимних осадков. В снежном покрове они распределяются неравномерно, что определяется высотой местности, неровностями рельефа, экспозицией склонов, влиянием растительного покрова и др. В результате работы ветра, в ложбинах, оврагах, понижениях за зиму накапливается намного больше снега, чем на ровной поверхности. Много снега собирается в местах скопления кустарниковой растительности и на опушках леса. С наступлением положительных температур воздуха на поверхности снега начинается снеготаяние.

Весной снеготаяние проходит три периода:

- Начало – снег лежит сплошным покровом, таяние происходит медленно, водоотдачи практически нет, не формируется сток (стаивает до 30% снега);
- Сход основной массы снежного покрова - интенсивная водоотдача, появляются проталины, стремительно нарастает величина стока (стаивает до 50% снега);
- Окончание таяния - стаивают остатки снега (стаивает до 20% снега). Максимальная водоотдача (80%) наблюдается в течение второго периода.

**3. Подземное питание.** Подземное питание занимает 3-е место по объему поступающих вод в реки (1/3 объема речного стока приходится на его долю).

Подземное питание рек определяется природой взаимодействия грунтовых (подземных) и речных вод. Подземные воды образуются в результате просачивания осадков (дожди и тающий снег) через пустоты в грунтах и почве. При достижении водой водоупорного слоя (глинистые отложения), она начинает накапливаться и формирует слой водопроницаемого пласта – водоносный горизонт, насыщенный водой, движущейся под влиянием силы тяжести по поверхности водоупора в направлении его уклона. В местах отрицательных форм рельефа (овраги, речные долины, озерные котловины), где происходит раскрытие водоносного слоя, подземные воды выходят на поверхность в виде рассредоточенного высачивания на участке склона или родников. Грунтовые и межпластовые воды существуют на протяжении всего года и обеспечивают питание рек круглогодично. В зоне многолетних мерзлых пород в питании рек принимают участие только подмерзлотные воды.

**4 Ледниковое питание.** Ледниковое питание обеспечивает всего лишь около 1 % стока рек.

Ледниковое питание имеют только реки, вытекающие из районов с высокогорными снежниками и ледниками. Область питания – это поверхность ледника, где происходит накопление его массы.

На водный режим ледники оказывают следующее действие:

- Регулируют сток, в засушливые жаркие годы уменьшение осадков компенсируется повышенным ледниковым питанием и наоборот;
- Перераспределяют сток в течение года – перемещают половодье с весеннего сезона на летний;

- Влияют на возникновение на разных участках рек вблизи ледников внутрисуточных колебаний стока.

Гидрограф, обусловленный ледниковым питанием, имеет большое число пиков в летнее время, вызванных колебаниями температуры воздуха в зоне ледников (рисунок р.Нарын).

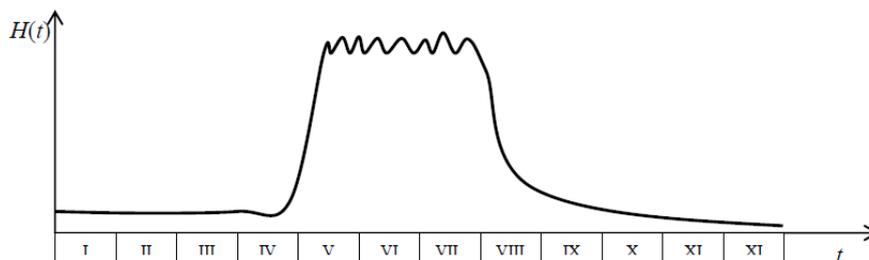


Рисунок. Ледниковое питание

**5. Смешанное питание.** Смешанным типом называют тот тип питания реки, когда вода в русло поступает из разного рода источников (снега, дождя, грунтовых вод и т.д.). Например, если река примерно половину своей воды получает от высокогорных ледников, а остальное - от дождей, то можно сказать, что у нее **питание смешанное**.

#### Расчленение гидрографа стока по видам питания.

Количественная оценка доли различных видов питания в формировании водного стока реки обычно осуществляется с помощью *графического расчленения гидрографа по видам питания*. В этом случае доля того или иного вида питания (например, снегового, дождевого, подземного на рисунке) определяется пропорционально соответствующим площадям на гидрографе.

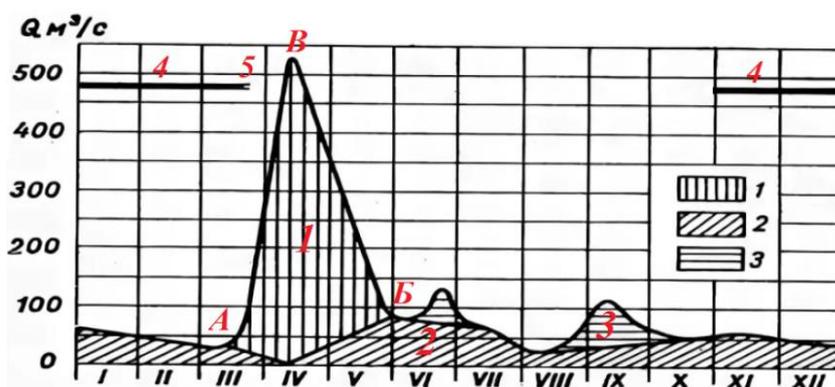


Рисунок. Схема расчленения гидрографа реки по видам питания:

*питание:* 1 – снеговое, 2 – подземное, 3 – дождевое, А, Б и В – начало, конец и пик половодья, 4 – ледостав, 5 – ледоход

Этот метод применяется для графического выделения объемов воды, сформированных различными источниками питания. В этом случае доля того

или иного вида питания определяется пропорционально соответствующим площадям на гидрографе. В результате расчетов можно получить количественную оценку каждого источника питания за год и, что особенно важно, выделить подземную составляющую общего годового стока.

Во многих случаях, особенно на малых и средних реках, границу подземного питания на гидрографе проводят просто по прямой линии, соединяющей точки начала и конца половодья.

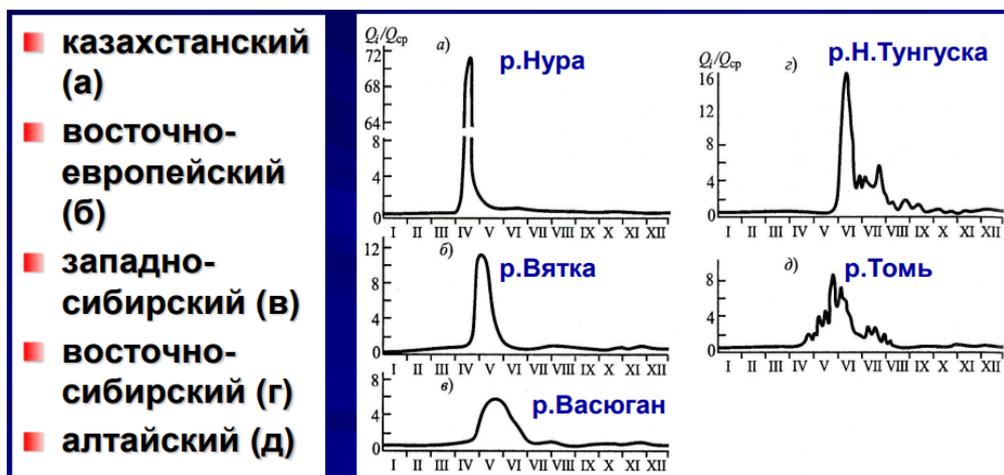
Возникают сложности также при разделении дождевого и снегового, ледникового и *подземного* питания, особенно в весенний и осенний периоды и т. д. В этих случаях для более надежного расчленения гидрографа по видам питания необходимо привлекать данные о дождевых осадках и температуре воздуха.

### Классификация рек по типам водного режима рек.

По отношению к водному режиму, согласно классификации Борис Дмитриевича Зайкова, выделяют три основные группы:

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

В разных климатических районах половодье проходит в разные месяцы в течение периода с марта по июнь.



Реки с весенним половодьем: а – Казахстанский тип (р. Нура); б – Восточно-Европейский (р. Вятка); в – Западно-Сибирский (р. Васюган); г – Восточно-Сибирский тип (р. Нижняя Тунгуска); д – Алтайский (р. Томь)

В зависимости от характера половодья и режима стока в остальные месяцы реки первой группы Б. Д. Зайков делит на пять типов:

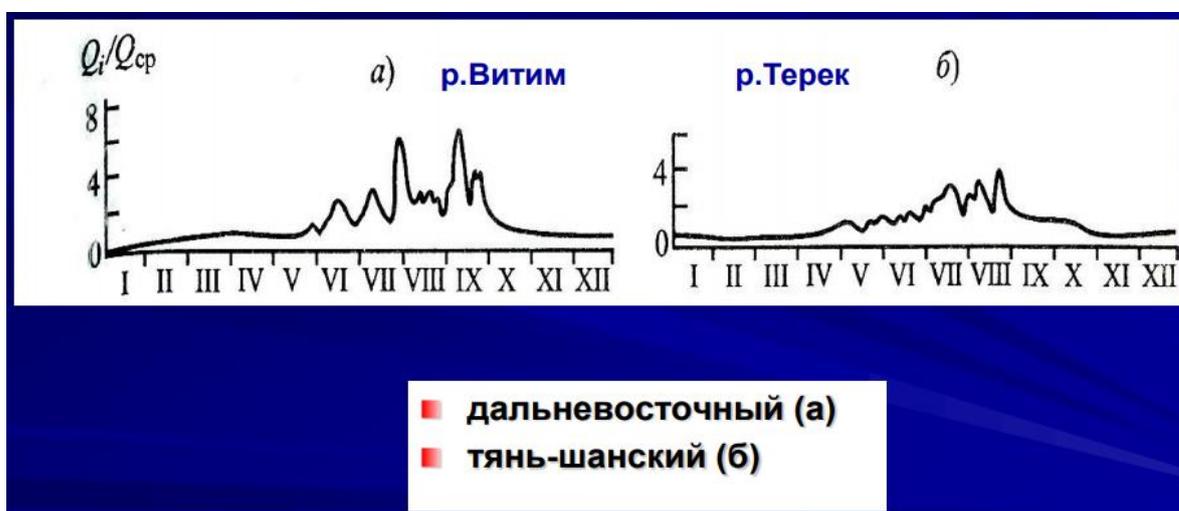
1 – Казахстанский (короткое половодье со значительным увеличением расхода воды, в остальную часть года сток очень мал);

2 – Восточно-Европейский (сравнительно высокое весеннее половодье, осенние паводки, р. Вятка);

3 – Западно-Сибирский (невысокое растянутое весеннее половодье, повышенный осенне-летний сток, р. Васюган);

4 – Восточно-Сибирский (очень долгое половодье с постоянными колебаниями расхода воды, летне-осенние паводки, зимняя межень, р. Тунгуска);

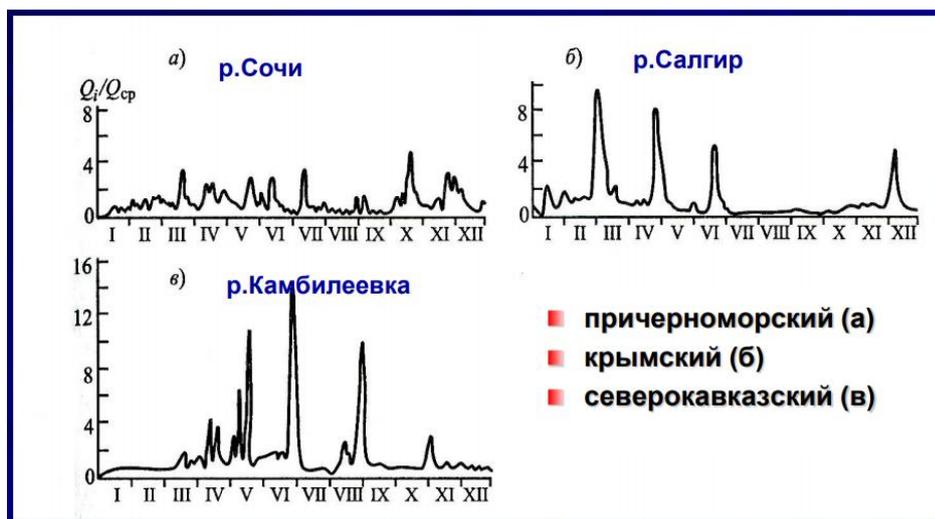
5 – Алтайский (невысокое растянутое половодье, повышенный летний сток, зимняя межень, р. Томь).



Реки с половодьем в теплую часть года: а – Дальневосточный тип (р. Витим, г. Бодайбо); б – Тянь-Шаньский (р. Терек, с. Казбеги)

На реках второй группы половодье проходит в месяцы с мая по октябрь и формируется в одних условиях преимущественно за счет муссонных дождей, а в других – в результате таяния высокогорных снегов и ледников. Заметим, что название «реки с половодьем в теплую часть года» условно, так как и на реках первой группы половодье проходит в месяцы с положительной температурой.

Реки третьей группы наименее распространены. Реки третьей группы отличаются кратковременными паводками, ежегодно наблюдающимися в определенные сезоны года.



Реки с паводочным режимом: а – Причерноморский тип (р. Сочи, с. Пластунка); б – Крымский (р. Салгир, г. Симферополь); в – Северо-Кавказский (р. Камбилеевка, с. Ольгинское)

### Зимний режим рек

Образование на реках в зимнее время ледяного покрова изменяет режим течения. Развитие ледовых явлений осенью и последующее исчезновение их весной теснейшим образом связано с климатическими условиями.

### Наблюдения за ледовым режимом

Наблюдения за ледовыми явлениями на реках проводят на гидрологических станциях и постах с целью освещения ледовой обстановки на участках рек (длина участка зависит от ширины реки и может составлять на малых реках не менее 200–500 м, а на средних и больших реках – от 0,5 до 2 км (две–три ширины реки)).

Участок наблюдений должен по возможности включать как плёсовый, так и перекатный участки реки. Для промерзающих до дна рек это условие обязательно.

Если нижележащий пережат на промерзающей реке находится на значительном расстоянии от поста, превышающем 1,5–2 км, то наблюдения за ледовой обстановкой на пережате ведутся параллельно с наблюдениями на плёсе (весной перед вскрытием реки, с начала наступления оттепелей до установления постоянного течения воды в русле и осенью со дня появления первых ледяных образований до установления на пережате ледяного покрова).

Для наблюдений выбирают наиболее возвышенные места берега, мосты, вышки и т. д., позволяющие иметь наибольший обзор реки выше и ниже поста.

Участок, в пределах которого описывают ледовую обстановку и место, откуда ведут наблюдения, выбирает специалист сетевого гидрологического подразделения и указывает наблюдателю при организации поста.

Наблюдения за ледовыми явлениями начинают со дня первого появления льда в районе участка наблюдения и продолжают до окончательного очищения водной поверхности реки ото льда. Ледовые наблюдения на постах выполняют ежедневно два раза в сутки в светлое время.

В период замерзания реки на участке наблюдений определяют:

- дату появления первых ледовых явлений;
- виды ледяных образований и ледовых явлений;
- степень покрытия льдом реки в периоды замерзания;
- ширину заберегов;
- наличие внутриводного льда;
- характеристики ледохода (шугохода);
- дату прекращения навигации (судоходства).

В период ледостава определяют:

- даты начала ледостава (полного, повторного);
- состояние и характер ледяного покрова;
- толщину льда;
- деформации ледяного покрова – трещины, навалы, гряды, полыньи;
- даты образования наледей;
- даты начала передвижения по льду (пешеходного, автомобильного).

В период вскрытия определяют:

- дату появления талой воды на льду;
- дату схода снега с поверхности льда;
- наличие закраин, подвижек льда;
- характеристики весеннего ледохода;
- дату начала навигации (судоходства);
- дату полного очищения реки ото льда.

Измерения толщины льда, снега на льду и подледной шуги производят 10-, 20-го числа и в последний день месяца. Особое внимание обращают на явления, которые могут значительно изменить естественный ход уровня. К

их числу в первую очередь относят зажоры и заторы; необходимо установить место и время их возникновения и причины образования.

### **Виды и периоды ледовых явлений**

Ледовый покров вначале возникает на мелководье: у берегов, в заливах. На неглубоких местах с малыми скоростями течения вода охлаждается наиболее интенсивно.

В ледовом режиме рек различают три периода: замерзание, ледостав и вскрытие.

**Замерзание рек.** Переход средней суточной температуры воздуха осенью через  $0^{\circ}\text{C}$  служит своеобразным «сигналом» приближающихся ледовых явлений. Через некоторое время и температура воды снижается до  $0^{\circ}\text{C}$ , и начинаются ледовые явления.

При замерзании воды, прежде всего, начинают образовываться начальные виды льдов. Порядок образования льдов: ледяные иглы — ледяное сало — снежура — шуга.

Начальная фаза осенних ледовых явлений — **сало**, поверхностные первичные ледяные образования, состоящие из иглообразных и пластинчатых кристаллов льда, по внешнему виду напоминающие пятна застывшего жира на воде. Появляются с наступлением отрицательных температур воздуха. Сало обычно плывет по реке в течение 3—8 дней.

Почти одновременно у берегов, где скорости течения меньше, образуются **забереги** — узкие полосы неподвижного тонкого льда у одного или двух берегов при незамерзшей основной части реки. Ширина заберегов растет, пока отдельные участки не смыкаются.

Различают следующие виды заберегов:

- первичные, образующиеся путем замерзания воды у берегов;
- наносные, возникающие во время ледохода или дрейфа льда в результате примерзания к берегу льда или шуги;
- остаточные, которые сохраняются у берегов при разрушении ледяного покрова.

По мере охлаждения всей толщи воды в реке начинает образовываться **внутриводный лед** — непрозрачная губчатая ледяная масса, состоящая из хаотически сросшихся кристалликов льда различных размеров и формы. Образуется при переохлаждении воды и интенсивном ее перемешивании на различных глубинах, а также на предметах, находящихся под водой (на тросах, сетях и т. д.).

Внутриводный лед, образующийся на неровностях речного дна, называют **донным льдом**.

Скопления внутриводного льда в виде комьев на поверхности или в толще потока образуют шугу. Движение шуги по поверхности или в толще реки называется **шугоходом**. К шуге на поверхности реки иногда добавляется битый лед, отрывающийся от заберегов, и **снежура** - плавающие в воде комковатые скопления снега в виде рыхлой, вязкой массы. Образуются при обильном выпадении снега на охлажденную водную поверхность.

Шуга обычно плывёт по поверхности. Ниже места образования она может останавливаться на участках с медленным течением, у поворотов реки. Слипаться с ледяным покровом, постепенно накапливаясь и уплотняясь.

По мере охлаждения воды начинается образование льда непосредственно на водной поверхности реки вдали от берегов. В процессе образования льдин участвуют скопления сала, шуги и снежуры. Начинается осенний ледоход. На больших реках он продолжается 10-12 дней, на малых - до 7 дней.

В период замерзания может наблюдаться **осенний ледоход**, образовавшийся от смерзания ледяного сала, снежуры и шуги на малых и средних реках со слабым течением. Такие льдины образуются из так называемого шугового льда и оторвавшихся заберегов на больших реках.

В период осеннего ледохода русло реки может оказаться забитым шугой и битым льдом. Закупорка русла этой ледяной массой называется **зажором**. Образование зажора сопровождается подъемом уровня воды на вышерасположенном участке реки. Иногда осенний ледоход сопровождается затором, т. е. закупоркой русла плывущими льдинами.

**Зажор** – скопление остановившейся шуги с включением мелкого льда. Зажор перекрывает часть или все живое сечение реки. Образовавшееся местное сопротивление вызывает подъём уровня воды перед зажором и его падение ниже по течению. Приход зажора с такими перепадами уровней к створу мостового перехода вызывает большие горизонтальные нагрузки на мост из-за высокого перепада уровней и деформацию подмостового русла вплоть до подмыва оснований опор.

Некоторые участки реки могут в течение долгого времени, иногда в течение всей зимы, не замерзать. Такие участки называют **полыньями** – участки реки без ледяного покрова. Они характерны для участков с быстрым

течением (перекатов) или с выходом в реку относительно теплых подземных вод или с поступлением промышленных и коммунальных стоков.

**Ледостав.** По мере увеличения числа плывущих льдин и их размера скорость движения ледяных полей уменьшается, и сначала в местах сужения русла, у островов, в мелких рукавах, а затем и на остальных участках русла ледяные поля останавливаются и смерзаются. Этому могут способствовать и заторы. Образуется сплошной ледяной покров — ледостав.

Толщина ледяного покрова на реках в течение зимы постепенно увеличивается.

Одним из наиболее простых способов оценки нарастания льда на реках служит установление эмпирической связи толщины льда с суммой отрицательных температур воздуха. Такую связь отражают, например, формулы Ф. И. Быдина:

$$h_{\text{л}} = 2\sqrt{\sum|T|};$$

$$h_{\text{л}} = 11\sqrt{\sum|T|},$$

где  $h_{\text{л}}$  - толщина льда в сантиметрах. В первой из этих формул используется средняя суточная, а во второй — средняя месячная температура воздуха. Необходимо отметить важную роль снежного покрова: чем его толщина больше, тем меньше толщина льда под снегом.

Колебания уровня в реке, деформации льда от изменений температуры и под воздействием ветровых нагрузок приводят к образованию трещин. При подъеме уровня воды, часть ледяного покрова заливается выходящей через трещины водой. Вода, замерзшая на поверхности льда, образует **наледи**.

**Наледь** – ледяные образования, возникающие в результате выхода и замерзания воды на поверхности льда при подъеме уровня или выходе грунтовых вод.

Малые реки в условиях сурового климата могут промерзнуть до дна. При промерзании реки до дна часто можно наблюдать такое явление. Грунтовая вода поднимает лед, и на поверхности образуются бугры. Давление воды растет, и, наконец, лед «взрывается»: куски льда разбрасываются в разные стороны, а накопившаяся вода разливается по ледяной поверхности. Неоднократные наслоения наледей намного превышают отметку ледяного покрова. Такие образования способны перекрывать большую часть отверстий труб и мостов, вплоть до полной их забивки.

Перед вскрытием рек происходят **подвижки льда**. **Подвижка льда** – небольшое перемещение ледяного покрова на отдельных участках реки, происходящее под влиянием течения, ветра, подъема уровня.

**Вскрытие рек.** С наступлением весны ледяной покров на реках начинает разрушаться. На этот процесс влияют солнечная радиация, поступление тепла из воздуха и с теплыми водами, механическое воздействие текущей талой воды.

Сначала начинает таять снег на льду. Талая снеговая вода ослабляет лед. У берегов реки под влиянием начавшегося нагревания грунта и стекания со склонов талых вод, а также повышения уровня в реке образуются прибрежные полосы чистой воды - **закраины**.

Продолжающийся подъем уровня воды в реке вследствие поступления в русло талых вод приводит лед в движение. Сначала это лишь небольшие смещения ледяных полей - **подвижки**, а затем ослабленный ледяной покров разбивается на отдельные льдины и начинается **весенний ледоход**.

Заторы во время весеннего ледохода часто приводят к значительному повышению уровней воды и даже к наводнениям.

**Затор льда** – нагромождение льдин во время ледохода в сужениях, излучинах русла реки, на мелях и других местах, где их проход затруднен, вызывают подъем уровня воды.

### **Режим озёр и болот. Влияние озёр и болот на сток рек**

Углубления земной коры, в которых расположены озера, получили название озерные котловины. Они могут различаться по происхождению.

Вода попадает в озера с атмосферными осадками, также ее несут реки и подземные воды. Расходуется вода на испарение или выносится реками. В зависимости от условий притока и стока воды различают озера сточные и бессточные.

К сточным озерам относятся те, из которых вытекают реки. Помимо этого все сточные озера являются пресными. Из рек в эти озера постоянно поступает и выносится вода. В этом случае отложений солей не происходит и вода становится пресной. Самым глубоким сточным озером считается озеро Байкал.

В бессточные озера реки вливаются, но не вытекают. Соответственно испарение воды происходит, соль накапливается в озере и не выносится из него. С течением времени вода таких озер становится соленой. Отдельные озера содержат так много солей, что они накапливаются в твердом виде. К таким соленым озерам в России относятся Эльтон и Баскунчак. Самым крупнейшим бессточным озером считается Каспийское море, названное так из-за своих размеров.



**Болото** — участок ландшафта, характеризующийся избыточным увлажнением, влаголюбивым живым напочвенным покровом.

Существуют низинные и верховые болота.

Низинные болота формируются в котловинах бывших озер, а также поймах рек. Питаются грунтовыми или речными водами, поверхность их плоская. Если грунтовые воды выносят много известняка, то на болотах формируется растительный покров из различных трав, к примеру, осока, тростники. Если вода содержит мало извести, то они будут моховые.

Верховые болота расположены в области водоразделов, на высоких плоских местах, бывших ранее сухими. Питаются они атмосферными осадками, поэтому распространены во влажном климате. Верховые болота покрыты сфагновым мхом, который содержит много влаги и не пропускает воздух к корням деревьев, отчего они подгнивают и падают.

Остатки растительности в условиях повышенной влажности разлагаются и со временем преобразуются в торф, используемый в качестве топлива, а также удобрения.

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 11 Виды регулирования стока.**

### **Необходимость регулирования речного стока.**

Регулирование речного стока является необходимым условием рационального использования рек и осуществляется водохранилищами путем перераспределения во времени объема естественного стока в соответствии с требованиями водопользователей.

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

В естественных условиях речной сток формируется под влиянием следующих связанных между собой факторов:

- климатических условий, включая осадки, температуру, влажность воздуха и др.;
- ландшафта водосборной площади (рельефа, почв, инженерно-геологических условий, растительности);
- морфометрических и гидравлических характеристик (размеры и конфигурация водосборной площади и речной сети, уклоны и строение русла и др.).

Из них главным фактором являются климатические условия.

В современных условиях существенное влияние на формирование речного стока также может оказывать хозяйственная деятельность человека.

Необходимость воздействия на естественный режим стока вызвана неравномерным распределением водных ресурсов по территориям, стока в пределах года (по сезонам) и стока по годам (многоводные и маловодные годы).

Естественный режим стока в большинстве случаев не совпадает с требованиями ряда водопользователей, возникающими при использовании водотоков. Необходимо изменение режима водных объектов для бесперебойного обеспечения водой населения, промышленности и сельского хозяйства, что достигается регулированием речного стока.

Изменение гидрологического режима водотоков осуществляется с помощью искусственных водоемов (водохранилищ), которые способствуют решению комплекса водохозяйственных задач: коммунального и промышленного водоснабжения, орошения и обводнения, гидроэнергетики, водного транспорта, лесосплава, рыболовства, борьбы с наводнениями и селями.

Широкомасштабное строительство водохранилищ развернулось после Второй мировой войны, т.е. после 1945 г. Водоохранилища стали создаваться не только для решения традиционных проблем развития энергетики, орошения земель, но и для водообеспечения крупных промышленных центров и регионов, улучшения экологического состояния природных объектов и районов, рекреационных потребностей населения (отдыха, спорта и т.п.).

Для этого в водохранилищах аккумулируется сток в одни периоды года, сезона, месяца, недели, суток и отдается накопленная вода в другие периоды.

Процесс аккумуляции стока называется наполнением водохранилища, а процесс отдачи накопленной воды – его сработкой.

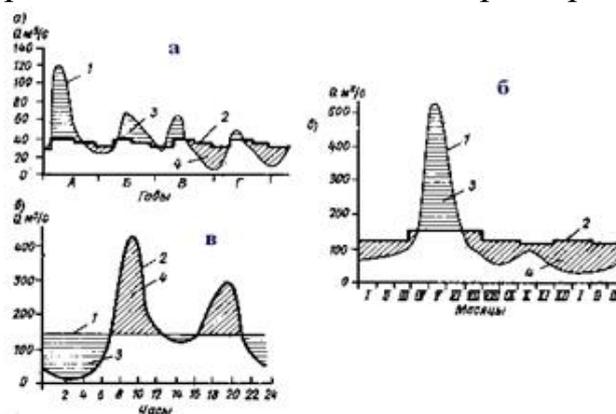
Различают суточное, недельное, краткосрочное, сезонное (годовое) и многолетнее регулирование стока.

Суточное регулирование заключается в перераспределении в течение суток практически равномерного стока реки в соответствии с требованиями водопользователей. Вода накапливается в водохранилище в часы малого потребления (обычно с 8 до 12 и с 18 до 24 часов) и расходуется из него в часы повышенного. Цикл регулирования (наполнение и сработка) равен одним суткам. Такое регулирование осуществляется водохранилищами малого объема, не вмещающими полностью воды половодий и паводков. Суточное регулирование распространено в водоснабжении и гидроэнергетике.

**Многолетний (а)**

**Сезонный (б)**

**Суточный (в)**



**1 – естественный ход изменения расходов воды, 2 – ход изменения расходов воды, необходимый водопользователям, 3 – аккумуляция воды в водохранилище, 4 – сработка объема воды в водохранилище**

Недельное регулирование заключается в перераспределении в течение недели относительно равномерного стока в соответствии с неравномерным потреблением. Объем водохранилища недельного регулирования стока равен объему недоиспользованного стока в два выходных дня, когда понижено водопотребление. Полный цикл при недельном регулировании (наполнение и сработка) равен неделе. Применяется оно в основном в промышленном

водоснабжении и гидроэнергетике. При недельном регулировании попуски воды из водохранилища уменьшаются в выходные и праздничные дни, когда большинство промышленных предприятий не работают.

Сезонное (годовое) регулирование стока позволяет перераспределять сток в течение сезона или года. Во время половодий и паводков водохранилища наполняют, в период межени сбрасывают.

Необходимость такого регулирования вызвана неравномерным распределением стока внутри года и несовпадением максимумов стока и потребления воды. Это наиболее распространенный тип регулирования, осуществляемый водохранилищами значительного объема, которые могут вместить воды половодий и паводков среднего по водности года. Их полезный объем составляет 8–20% годового стока питающей реки.

Сезонное регулирование – наиболее распространенный вид регулирования стока (применяется при водоснабжении, в гидроэнергетике, при орошении и в других отраслях народного хозяйства).

Водоохранилища сезонного регулирования могут осуществлять также суточное и недельное регулирование.

Многолетнее регулирование стока заключается в перераспределении стока в течение длительного многолетнего периода. Цикл регулирования (наполнение и сброс) длится несколько лет. Дефицит в воде в маловодные годы покрывается из запасов воды, накопленных в водохранилище за многоводный период. Многолетнее регулирование – наиболее полный и совершенный вид регулирования, отвечающий задачам комплексного использования водных ресурсов. При этом виде регулирования нужны существенно большие по размерам водохранилища, чем при других.

По степени использования стока различают полное и неполное регулирование. При полном регулировании используется весь сток, и водохранилище работает без сброса. При не полном – часть стока не используется и идет на сброс.

#### Каскадное и компенсирующее регулирование стока

В настоящее время, наряду с рассмотренными видами регулирования, широко применяются каскадное и компенсирующее регулирование.

Каскадное регулирование стока имеет место, если водохранилища размещены последовательно в виде ступеней на одной реке. Примером такого регулирования может служить каскад водохранилищ, построенных на Волге.

Компенсирующее регулирование обеспечивает покрытие дефицита в воде путем пусков из водохранилища, расположенного выше водозабора.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 12 Водохранилища. Назначения водохранилищ, их классификация.

### Классификация водохранилищ

Водохранилища классифицируются по ряду признаков.

**По гидрографическому признаку** различают три типа водохранилищ: *русловые, озерные и смешанные*

Водохранилище, которое образуется в результате преграждения течения реки плотиной и затопления речной долины, называется *русловым* (рис. 1, а). Такие водохранилища обычно имеют большую длину и площадь водного зеркала. Для создания в них больших запасов воды необходимо значительное повышение уровня воды.

*Озерное* водохранилище образуется в результате преграждения плотиной истока реки, вытекающей из озера (рис. 1, б). Вода при этом заполняет озерную чашу. В таких водохранилищах с большой площадью водного зеркала могут создаваться значительные запасы воды при сравнительно небольших повышениях уровня озера.

При возведении плотины несколько ниже истока реки, вытекающей из озера, образуется *смешанное* водохранилище, которое включает емкости чаши озера и прилегающей к нему долины реки (рис. 3, в).

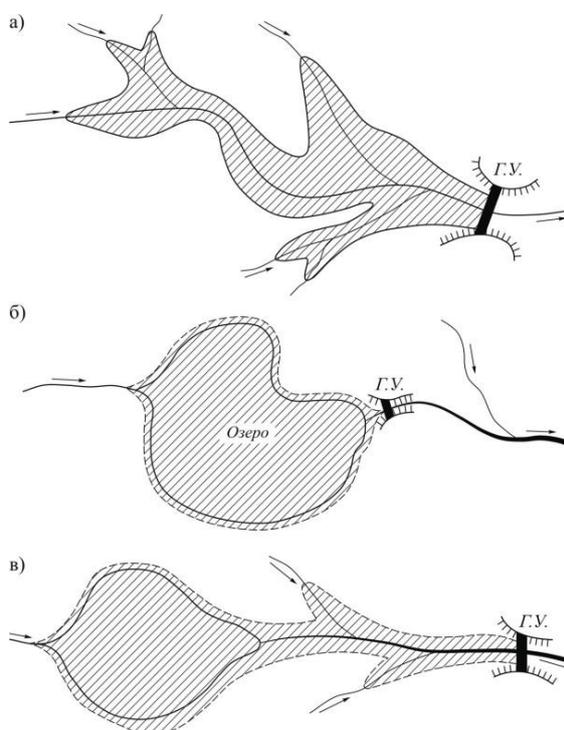


Рисунок. Типы водохранилищ:

*а – русловое; б – озерное; в – смешанное;*

*Г.У. – гидроузел в месте близкого расположения коренных берегов*

**По размерам** водохранилища делятся на следующие категории:

- крупнейшие – с полным объемом  $V_{НПУ}$  более  $50 \text{ км}^3$ , площадью водной поверхности  $\omega$  – более  $5000 \text{ км}^2$ ;
- очень крупные  $V_{НПУ}=50 - 10 \text{ км}^3$ ,  $\omega =5000 - 500 \text{ км}^2$ ;
- крупные  $V_{НПУ}=10 - 1 \text{ км}^3$ ,  $\omega =500 - 100 \text{ км}^2$ ;
- средние  $V_{НПУ}=1 - 0,1 \text{ км}^3$ ,  $\omega =100 - 20 \text{ км}^2$ ;
- небольшие  $V_{НПУ}=0,1 - 0,01 \text{ км}^3$ ,  $\omega =20 - 2 \text{ км}^2$ ;
- малые  $V_{НПУ}=$  меньше  $0,01 \text{ км}^3$ ,  $\omega =$  менее  $2 \text{ км}^2$

### **Нормативные объемы и уровни воды в водохранилищах**

Снизу (от дна) вверх в водохранилищах различают следующие объемы и ограничивающие их уровни (рисунок 1):

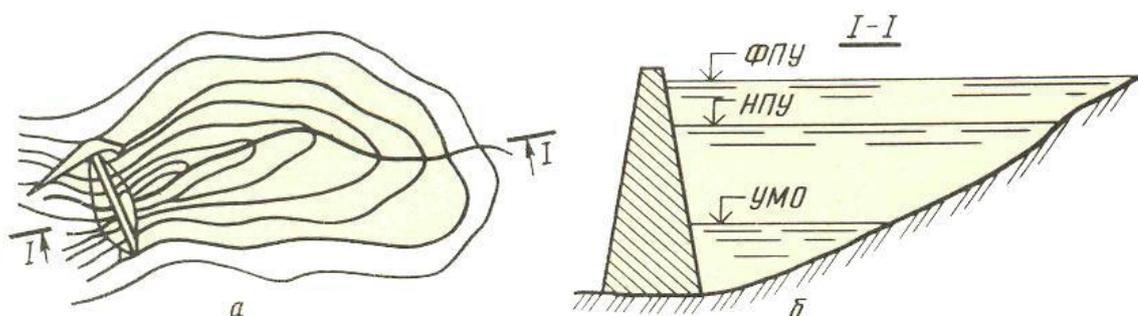


Рисунок План (а) и продольный профиль (б) водохранилища

Мертвый объем водохранилища  $V_{мо}$  - объем воды, расположенный ниже уровня наибольшего возможного опорожнения водохранилища и необходимый для его нормальной эксплуатации. При его расчете учитывают следующие условия: заиление водохранилища наносами, санитарно-технические требования, обеспечение необходимого качества воды, условия для судоходства, рыбного хозяйства, мелиорации, гидроэнергетики и др. Уровень поверхности воды, ограничивающий этот объем сверху, называют уровнем мертвого объема (УМО).

Полезный объем  $V_{плз}$  – основная рабочая часть объема водохранилища, предназначенная для регулирования стока. Он зависит от назначения водохранилища, вида регулирования стока; определяют его водохозяйственным расчетом.

Полный объем водохранилища соответствует отметке НПУ – наивысшему проектному уровню верхнего бьефа, который поддерживают в нормальных условиях эксплуатации гидроузла:  $V_{нпу}=V_{мо}+V_{плз}$

Форсированный объем (объемом форсировки  $V_f$ ) – часть паводка, задержанного водохранилищем и располагающегося между отметками ФПУ и НПУ. Регулирующее влияние водохранилища на максимальный расход состоит в том, что при прохождении паводка часть стока задерживается в водохранилище и уровень воды в нем превышает расчетную отметку НПУ, достигая форсированного подпорного уровня ФПУ.

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 13 Потери воды из водохранилища. Заиление водохранилищ.

### Потери воды из водохранилища.

Потери воды из водохранилищ слагаются из потерь на испарение, фильтрацию, ледообразование и потерь, связанных с водохозяйственным использованием водотока на санитарные попуски, на попуски в рыбоходах, бревноспусках и пр. При водохозяйственных расчетах они подлежат учету.

Потери воды на испарение с открытой поверхности определяют по данным ближайших метеостанций или по расчетным формулам и выражают высотой слоя испарения. При расчетах высоту слоя испарения уменьшают на величину слоя осадков, выпадающих непосредственно на зеркало водохранилища.

Если площадь зеркала водохранилища составляет 5-10% и более его водосборной площади, учитывают изменение условий стока с площади водохранилища после его наполнения.

При сезонном регулировании годовое испарение принимается максимальным, а его распределение - средним многолетним. При многолетнем регулировании испарение принимается равным среднему многолетнему.

Суммарная за год величина слоя дополнительного испарения определяется по формуле

$$Z_{дон} = Z_e - X \cdot (1 - \alpha_c), мм$$

где  $Z_e$  и  $X$  – испарение с водной поверхности и норма осадков для района проектирования, соответственно (таблица 10.1), мм;  $\alpha_c$  – коэффициент стока (в работе принимается равным 0,35).

*Таблица Значения средних значений за год испарения с водной поверхности ( $Z_e$ )*

*и осадков ( $X$ ).*

Область проектирования	$Z_e$ , мм	$X$ , мм
Витебская	560	650
Минская	570	650
Гродненская	570	700
Брестская	600	550
Гомельская	620	600
Могилевская	580	600

Внутригодовое распределение испарения по месяцам устанавливается, имея процентное распределение по месяцам

Таблица Значения испарения по месяцам года.

Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Сумма
Z <sub>доп.</sub> %	-8	4	10	18	26	24	16	8	2	100
Z <sub>доп.</sub> мм										

Потери на фильтрацию слагаются из фильтрационных потерь через тело земляной плотины, в обход плотины и под нее и через ложе водохранилища. Для более или менее точной оценки фильтрационных потерь необходимо иметь ясное представление о геологическом строении створа плотины и всей чаши водохранилища, о фильтрационных свойствах слагающих грунтов и уровнях грунтовых вод.

В предварительных расчетах фильтрационные потери принимают равными слою воды, теряемому в течение года с площади зеркала. При хороших гидрогеологических условиях (водонепроницаемые грунты в ложе водохранилища, уровень грунтовых вод близок к поверхности) этот слой принимают равным 0,5 м в год. При средних условиях - 0,5 + 1,0 м в год, при плохих условиях (водопроницаемые породы) 1,04-2,0 м в год.

Фильтрационные потери учитывают и определенной долей наличного объема водохранилища, теряемой в месяц или в год. Фактические потери воды на фильтрацию из водохранилищ по мере их заиливания уменьшаются.

Для приближенной оценки величины потерь на фильтрацию в зависимости от гидрологических условий применяют следующие нормы (в процентах от наличного объема воды в водохранилище):

- при хороших гидрологических условиях — величина потерь от 5 до 10% в год или 0,5...1,0% в месяц;
- при средних гидрологических условиях — 10...20% в год или 1,0...1,5% в месяц;
- при плохих гидрологических условиях — 20...40% в год или 1,5...2,0% в месяц.

Потери на ледообразование на водохранилищах в период отрицательных температур являются следствием установления ледяного покрова, что приводит к недоиспользованию в этот период части стока, которое должно быть учтено при выполнении водохозяйственных расчетов.

Потери на ледообразование зависят от толщины ледяного покрова, площади зеркала водохранилища и могут достигать значительной величины.

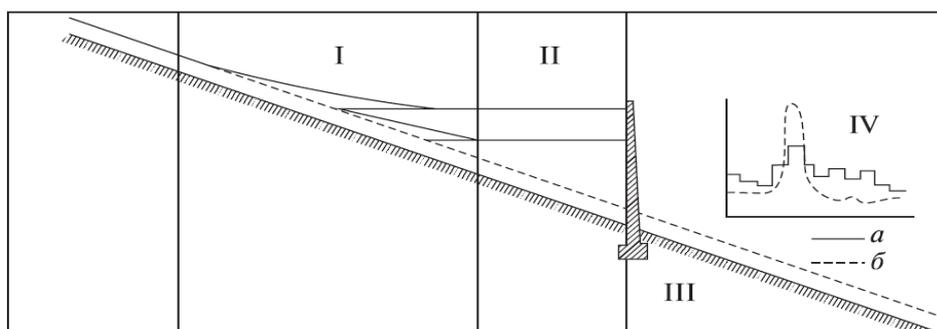
Прочие потери, связанные с водохозяйственным использованием водотока, где создается водохранилище, определяются по фактическому водопотреблению и суммируются по отдельным периодам.

## Заиление водохранилищ.

Водохранилища, осуществляющие сезонное и многолетнее регулирование стока, имеют значительный размах колебаний уровней воды, приводящий к возникновению больших площадей переменного затопления и постоянному изменению контакта водоема с берегами. На крупных равнинных водохранилищах амплитуда колебаний уровней составляет в среднем 5–15 м (на водохранилищах Беларуси – до 5 м), на горных реках достигает нескольких десятков метров.

После создания водохранилищ на реках формируются три основные зоны с характерными изменениями условий руслоформирования: зона выклинивания подпора, зона собственно водохранилища и зона нижнего бьефа (рис. 1).

**В зоне выклинивания подпора I** одновременно является и зоной переменного подпора, расходы воды остаются такими же, как в естественных условиях, но проходят при повышенных уровнях.



Основные зоны водохранилища

при зарегулированном (*a*) и естественном (*б*) режимах:

- I – зона выклинивания подпора; II – зона, непосредственно занятая водохранилищем;  
III – нижний бьеф; IV – гидрограф стока

Верхняя граница зоны может перемещаться вверх и вниз по течению в зависимости от величины подпора (колебания уровня). Наиболее низкое положение (ближе всего к плотине) место выклинивания (граница) подпора занимает обычно в начальную фазу половодья, когда водохранилище обычно сильно сработано.

По мере наполнения водоема граница подпора перемещается выше по реке. Во время летней межени, когда уровень водохранилища постепенно срабатывается, граница подпора медленно смещается обратно вниз по течению.

В зоне переменного подпора происходит накопление донных и взвешенных наносов, которые образуют первичное тело заиления, напоминающее дельту реки.

**В зоне, непосредственно занятой водохранилищем II**, возникают процессы, резко отличные от наблюдавшихся в естественных условиях. В образованной плотиной чаше водохранилища происходят процессы ее *заиления и занесения*.

**Зона нижнего бьефа III**, начинаясь у самой плотины, заканчивается створом, в котором восстанавливаются сток наносов и водный режим. Главная особенность режима стока в этой зоне заключается в его выравнивании: срезается половодье, задерживаемое в водохранилище, сбросы из него приводят к увеличению меженных расходов воды (см. гидрограф **IV** на рис. 1), резко уменьшается сток речных наносов.

В результате уменьшения расхода наносов (часть их откладывается в водохранилище) и увеличения транспортирующей способности потока происходит усиление его размывающей деятельности. Особенно интенсивно размывается дно непосредственно вблизи турбин и водосливных частей плотины, где находится участок *местного размыва*. Его глубина может достигать 10–20 м на крупных гидроузлах, что представляет значительную угрозу устойчивости сооружения, ухудшает условия водозаборных устройств и т. д. Наибольшему врезанию русла способствуют холостые сбросы во время экстремальных половодий и паводков и др.

Глубина размыва достигает какого-то предела, когда скорость на размываемом участке уменьшится настолько, что прекратится движение наносов определенной крупности. Это создает так называемую *отмостку* в русле, не допускающую дальнейшего размыва в глубину. Процесс отмостки состоит в том, что мелкие частицы грунта вымываются и уносятся потоком, крупные оседают на дне (отмачивают дно), препятствуя его дальнейшему размыву.

На более протяженном участке ниже плотины отмечается *общий размыв*, который по мере восстановления нагрузки потока наносами постепенно затухает вниз по течению. Длина участка общего размыва ниже плотин может достигать десятков и даже сотен километров на очень больших реках.

Характер деформаций на участке общего размыва в значительной мере зависит от того, какой тип руслового процесса существовал до начала регулирования стока воды. Выравнивание внутригодового распределения стока сопровождается образованием осередков, островов, новой системы разветвлений. Если на пойме были протоки, возможно их отмирание и переход русла от многорукавного к однорукавному и т. д. На меандрирующих реках происходит изменение форм и параметров излучин в

соответствии с изменившимися гидравлическими условиями. С течением времени темпы русловых перестроений постепенно затухают.

Из-за срезки расходов и уровней воды водохранилищем значительно уменьшается частота и продолжительность затопления пойм. Все это вызывает негативные экологические процессы деградации поймы, снижения ее биопродуктивности (кормовые луга, рыбное хозяйство).

### Заиление и занесение водохранилищ

Заиление водохранилища – это процесс заполнения емкости водохранилища наносами, вносимыми в него поверхностным стоком, а также наносами, образующимися в результате разрушения берегов.

Понятия *заиления* и *занесения водохранилищ* различают. Заиление происходит взвешенными наносами, а занесение – донными наносами и продуктами разрушения берегов водохранилищ (*абрази*). В небольших водохранилищах горных рек преобладают процессы занесения (особенно селевыми потоками), в водохранилищах равнинных рек – процессы заиления (рис. 2).

Заиление происходит по всей площади водохранилища, занесение же начинается в верхней его части и постепенно перемещается в сторону плотины. Крупные перестроения берегов в результате колебаний уровня воды, ветрового волнения, вдольбереговых течений и т. д. вызывают обвалы и оползни, усиливающие процессы заиления и занесения водохранилищ.

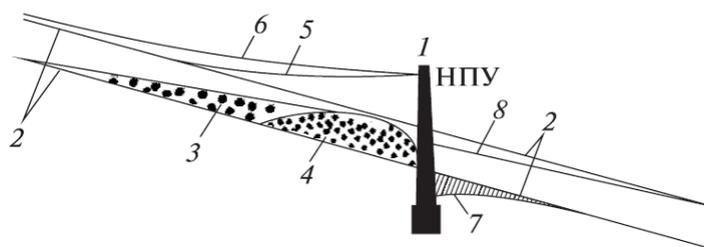


Схема заиления и занесения верхнего бьефа и размыва нижнего бьефа гидроузла:

1 – плотина; 2 – уровень воды и дно реки до сооружения водохранилища; 3 – тело заиления водохранилища мелкими наносами; 4 – тело занесения водохранилища крупными наносами; 5 – нормальный подпорный уровень воды (НПУ) в водохранилище после сооружения плотины; 6 – то же после заиления и занесения части водохранилища; 7 – размыв русла в нижнем бьефе; 8 – уровень воды в нижнем бьефе после размыва.

В водохранилищах руслового типа отложения наносов распределяются почти равномерно или приобретают вид гряды, постепенно передвигающейся из верхней части водохранилища к плотине. Процесс заиления водохранилищ носит затухающий характер, происходит повышение дна и уменьшение глубин в зоне кривой подпора.

Водохранилище, которое образуется в результате преграждения течения реки плотиной и затопления речной долины, называется *русловым*. Такие водохранилища обычно имеют большую длину и площадь водного зеркала.

Ориентировочно продолжительность периода заиления  $T$  (в годах) можно оценить отношением мертвого объема водохранилища  $V_M$  к объему годового стока наносов  $\Sigma R$ , поступающих в водохранилище:

$$T = V_M / \Sigma R.$$

Процесс заиления больших водохранилищ равнинных рек ввиду пониженной их мутности длителен и обычно измеряется сотнями лет. На горных реках процесс заполнения водохранилищ наносами происходит значительно быстрее, чем на равнинных. Это обусловлено большими уклонами горных рек, более высокими расходами наносов (особенно при образовании селей) и меньшими объемами водохранилищ.

Известны случаи, когда продолжительность заиления и занесения водохранилищ ограничивалась 1–3 годами. Примером быстрого заиления водохранилищ, созданных на больших реках, может служить Фархадское водохранилище на реке Сырдарья, которое было полностью заилено в течение 15 лет.

### **Переформирование берегов водохранилища.**

Процессы размыва и обрушения берегов (абразия) и отложения части обрушившегося материала и приносимых наносов (аккумуляция) в береговой части водохранилищ называют переформированием берегов. При проектировании водохранилищ необходимо учитывать размеры переформирования берегов, объемы заиления продуктами размыва, последствия этих процессов для эксплуатации водохранилищ и хозяйственного освоения прибрежной территории.

Переформирование берегов водохранилища - процесс достаточно длительный и сложный. На его интенсивность влияет ветровое волнение, колебание уровня воды при сработке и наполнении водохранилища, состав грунтов и гидрологические условия прибрежной зоны, скорости вдольбереговых течений, режим движения влекомых наносов и др. наиболее интенсивно процесс переработки берегов протекает в первые годы эксплуатации водохранилища. С течением времени наступает динамическое равновесие и формируется устойчивый профиль береговой отмели, достаточно пологий широкий, защищающий берег от дальнейшего размыва.

### **Водохранилища и окружающая природная среда.**

Народнохозяйственное значение водохранилищ огромно, и оно, безусловно, будет возрастать. Вместе с тем создание водохранилищ - это

пример глубокого вмешательства человека в природные процессы на обширных территориях. Суммарные объемы воды и площади водной поверхности водохранилищ по своим величинам сопоставимы с запасами воды в руслах рек и поверхностью морей. Последствия, вызванные созданием водохранилищ, сказываются на природе и хозяйстве прилегающих и отдаленных территорий.

**Затопление и подтопление земель.** При заполнении водохранилищ происходит затопление значительных площадей. В среднем 85...95% водной поверхности водохранилищ приходится на затопление земли. Значительный удельный вес среди этих земель составляют сельскохозяйственные угодья и леса. В связи с подъемом грунтовых вод после заполнения водохранилища образуется зона подтопления. Ширина зоны подтопления может быть весьма значительной и измеряться многими километрами. К отрицательным последствиям подтопления относятся: заболачивание земель в зоне избыточного увлажнения и засоление почвы в лесостепной и степной зонах, подтопление домов и сооружений, ухудшение санитарного состояния местности и т.д.

**Переформирование берегов и дна.** Частые колебания уровня воды в водохранилище в период его эксплуатации, ветровое волнение, которое на крупных водохранилищах значительное (волны на водохранилищах достигают 4м ), и береговые течения вызывают размывы и обрушение берегов. Процессы абразии необычно активны и протекают длительное время, исчисляемое десятилетиями. Они приводят к отступлению берегов на десятки и сотни метров (например, на Братском водохранилище до 750м), изменению глубин, образованию подводных отмелей, заилению и изменению объема и площади водохранилища.

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

В зону затопления, подтопления и переформирования берегов водохранилищ нередко попадают объекты народного хозяйства: заводы, фабрики и автомобильные дороги, линии электропередач и т.д. Переселение населения, перенос и строительство населенных пунктов и хозяйственных объектов на новом месте сопряжено с большими затратами материальных средств.

**Дополнительные потери воды.** За счет разности между испарениями с водной поверхности водохранилища и с той же территории до затопления, включающей поверхность суши и реки в естественных условиях, появляются

дополнительные потери воды, которые в отдельных районах играют немалую роль в общем объеме безвозвратного водопотребления.

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

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

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

**Влияние на климат.** Многочисленные исследования и наблюдения показывают, что водохранилища не являются источником коренного преобразования климатических условий. В тоже время они вносят заметные изменения в местный метеорологический режим.

Весной водохранилища оказывают охлаждающее влияние на прибрежные территории, а во второй половине теплого периода (до ледостава), отдавая накопленное тепло, оказывают тепляющее воздействие. Под влиянием водохранилища в прибрежной полосе, как правило, уменьшается континентальность климата: ход температур становится более плавным, суточная амплитуда температур воздуха увеличивается, весенние заморозки прекращаются в более ранние сроки, а осенние - наступают позже и т.д.

В районе крупных водохранилищ несколько увеличиваются количество осадков, скорость и повторяемость ветров.

**Влияние водохранилищ на растительность и животный мир.** Создание водохранилищ вызывают существенные изменения почв, растительности и животного мира. Постоянное и глубоководное (более 2м) затопление территории при создании водохранилищ приводит к полной гибели существовавшей наземной растительности. В зоне мелководного постоянного затопления также почти полностью отмирает древесно-кустарниковая и изменяется травянистая растительность. Вдоль берегов

водохранилищ в зоне умеренного климата при глубинах менее 2...2,5м. формируется пояс из тростника и камыша.

В зоне сильного подтопления (глубина залегания грунтовых вод менее 1м) большинство деревьев или гибнет, или же сильно угнетено. В зонах умеренного и слабого подтопления ( $h_{ГВ} > 1м$ ) водное и минеральное питание растений, как правило, улучшается и прирост древесины увеличивается иногда на 50...70%.

Создание водохранилищ наносит ущерб животному миру. Во время заполнения водохранилищ, продолжающегося иногда в течение нескольких лет, весьма заметно падает численность многих видов животных из-за гибели молодняка в результате непрерывно меняющихся условий увлажнения. Затопляются гнезда и гибнут отложенные яйца у многих видов птиц, уничтожаются места обитания животных при лесочистке ложа водохранилища. Переформирование берегов, а также колебания уровня воды в процессе эксплуатации водохранилищ весьма неприятны для животных и вызывают их массовую миграцию.

**Качество воды в водохранилищах.** Обеспечение чистоты воды в водохранилищах - одна из важнейших проблем их создания и эксплуатации. При разработке проектов создания водохранилищ и правил их эксплуатации необходимо учитывать интересы потребителей в отношении обеспечения необходимого качества воды. Наиболее строгие требования к качеству воды водохранилищ предъявляет коммунальное водоснабжение, а также рыбное хозяйство. Для сельскохозяйственных потребителей важна степень минерализации воды.

Водоохранилища выступают в роли гигантских отстойников. Вследствие значительного уменьшения скорости течения воды в водохранилище происходит выпадение взвешенных наносов, в десятки раз уменьшается мутность воды, повышается прозрачность, снижается ее бактериальное загрязнение.

Однако необходимо учитывать и целый ряд отрицательных последствий влияния водохранилищ на качество воды. Отметим лишь некоторые из них.

В начальный период после заполнения водохранилища, особенно в первые 2...3 года, на качестве воды отрицательно складываются последствия затопления почвенного покрова, кустарника, леса, населенных пунктов. В этот период в водохранилище интенсивно развиваются биогенные процессы (гниение и т.д.), появляется сероводород, увеличивается количество бактерий, изменяется вкус воды, ее цвет и т.д. продолжительность этого периода зависит от размеров водохранилища, его географического

положения, характера затопления территории, степени и качества ее очистки и санитарной обработки перед заполнением водохранилища.

В последующем на качество воды в водохранилище основное влияние оказывают гидробиологические процессы и антропогенные факторы (т.е. влияние человеческой деятельности).

Замедление скорости течения воды, резкое снижение турбулентного перемешивания воды приводит к образованию застойных зон, к дефициту кислорода, ослаблению самоочищающейся способности водохранилища, накоплению биогенных элементов (сероводорода, метана, аммиака и т.д.). Избыток биогенных элементов в условиях повышенных температур и при значительном дефиците кислорода создает благоприятные условия для чрезмерного развития отдельных представителей фитопланктона, что приводит к «цветению» воды. На водохранилищах наибольшее распространение получили так называемые сине-зеленые водоросли. При цветении уменьшается количество кислорода, ухудшается химико-биологический режим воды, выделяются токсические элементы, что не позволяет использовать водную растительность для сельскохозяйственного производства.

При проектировании, строительстве и эксплуатации водохранилищ должны быть проанализированы все возможные последствия их влияния на окружающую природную среду и найдены оптимальные решения, обеспечивающие наибольший экономический эффект при минимуме нарушений в природе и восполнении причиняемого ущерба.

[Вернуться в оглавление](#)

## **Лекция 14 Общая методика расчета водохранилищ. Сезонно-годовое регулирование стока.**

В водохранилищах годового регулирования особенно ответственной задачей является пропуск весеннего паводка. Только при правильном управлении водосбросными устройствами и работой турбин гидроэлектростанции в весенний период можно обеспечить хорошую эксплуатацию водохранилища на протяжении всего водохозяйственного года. Для правильного назначения режима работы водохранилища на предстоящий период паводка обязательным является использование прогноза объема воды во время весеннего паводка и, в частности, объема сброса воды, чтобы не допустить переполнения водохранилища.

Режим работы водохранилища годового регулирования на период весеннего паводка назначают с учетом следующих основных требований:

- обеспечение наполнения водохранилища до нормального подпорного уровня (НПУ);
- недопущение превышения уровня водохранилища над НПУ;
- обеспечение наибольшей выработки энергии гидроэлектростанцией.

На пропуске многоводного паводка в самом начале его наступления открываются на полную высоту все отверстия водосливной части плотины. Донные отверстия вводятся в работу в том случае, если это требуется по ходу притока воды, при уровнях водохранилища, близких к НПУ.

Схема пропуска средних по водности паводков заключается в том, что в начале паводка отверстия водосбросной плотины остаются закрытыми. При уровне воды в водохранилище на 2-3 м ниже НПУ начинается постепенное открытие водосливных отверстий, и только иногда используют донные отверстия.

При пропуске маловодных паводков все отверстия плотины остаются закрытыми до тех пор, пока не создается уверенность заполнения водохранилища до НПУ. После этого при необходимости поднимается часть щитов водосливных отверстий для кратковременного сброса воды. В большинстве случаев во время маловодных лет сбросы воды через плотину вообще не производятся.

### **Сезонно-годовое регулирование стока**

Сезонно-годовое регулирование заключается в перераспределении стока из многоводных в маловодные сезоны. Цикл работы водохранилища от наполненности и сработки – 1 год. При расчете с-г регулирования встречаются два случая.

1. Задано потребление и необходимо найти полезный объём водохранилища, необходимый для покрытия этого потребления.
2. Объём водохранилища определяется местными условиями и необходимо найти возможное потребление из водохранилища.

Во всех случаях расчеты выполняются путём сопоставления притока и потребления.

При расчетах сезонно-годового регулирования необходимо учитывать тактность работы водохранилища.

Рассмотрим случай однократной работы водохранилища, когда в течении года один раз заполняется и один раз срабатывается. При двух и многотактной работе водохранилища, такты могут быть зависимые и независимые. При независимых тактах объём предыдущих избытков всегда больше объёма предыдущих недостатков. При зависимых тактах объём хотя бы одного из последующих недостатков больше объёма предыдущего избытка.

В ходе расчетов водохранилища с-г регулирования при заданном потреблении определяют промежуточный объём, момент опорожнения, потери воды и отметки ФПУ, НПУ, УМО.

Расчеты ведут таблично-цифровым методом в зависимости от вариантов регулирования. По первому варианту регулирования делается всё возможное для быстрого заполнения водохранилища. По второму варианту регулирования водохранилище держат заполненным возможно короткое время.

Таблично-цифровой метод заключается в сопоставлении за месячные интервалы времени величины притока и потребления, определяются избытки и недостатки с учётом тактности работы водохранилища определяется полезный объём.

Расчеты могут выполняться с учётом потерь и без учёта потерь.

Полезный объём водохранилища определяется путем сопоставления графика притока и потребления табличным способом с учетом потерь при регулировании по первому варианту, т.е. расчет ведем с момента опорожнения и ведем "ходом назад" (против часовой стрелки), вычитая избытки и прибавляя недостатки и потери, до получения к началу какого-то месяца наибольшей величины объёма (после чего объём начнет уменьшаться). Эта наибольшая величина объёма и будет равна полезному объёму плюс мертвый – полный объём водохранилища. Далее возвращаемся к моменту опорожнения и ведем расчет "ходом вперед", вычитая недостатки и потери и прибавляя избытки до момента, пока расчет не замкнется. Если

величина окончательного объема превысит величину полного объема водохранилища, то в графу окончательного объема записываем полный объем, а полученная разница записывается в графу сброса.

Объем потребления определяется путем анализа потребителей. В учебных целях объем воды на потребительские нужды определяется следующим образом. Рассчитанная сумма притока за год ( $23,00 \text{ млн.м}^3$ ), умножается на  $0,75$  и распределяется равномерно по месяцам  $23,00 \cdot 0,75 = 17,25 / 12 = 1,44 \text{ млн.м}^3$ . Заносятся эти одинаковые значения в графу 3 (*потребление  $\Sigma q$* ). Далее находится разница между притоком и потреблением и записывается в графы 4 и 5 (в зависимости от знака).

Дальнейший расчет ведется *построчно*. Записывается мертвый объем ( $0,23$ ) в графы 6 и 13 на начало многоводной фазы. Если выделяется две или более фаз, где имеющиеся водные ресурсы превышают потребление, то за расчетный принимается наиболее многоводная фаза. В нашем случае, мертвый объем приходится на начало марта и конец февраля и к значению в графе 13 (нижнему) прибавляется недостаток за II месяц (графа 5) и записывается на начало II месяца (графа 6):  $0,23 + 1,31 = 1,54$ . Находится среднее между значениями в графах 13 и 6 и записывается в графу 7 напротив II месяца:  $(0,23 + 1,54) / 2 = 0,89$ . Далее по графику 3 находится площадь зеркала  $F$  и записывается в графу 8. В графу 9 переписываются значения дополнительного испарения из таблицы 10.2. Определяются потери на испарение по формуле  $W_z = (Z_{дон} \cdot F) / 1000 = (0 \cdot 0,38) / 1000 = 0,00$ . Потери на фильтрацию принимаются в размере 1% от величины расчетного объема (хорошие гидрологические условия) и заносятся в графу 11:  $0,89 \cdot 1 / 100 = 0,01$ . В графе 12 записываются суммарные потери:  $0,00 + 0,01 = 0,01$ . Далее к предварительному объему в графе 6 прибавляются суммарные потери в графе 12 и записываются в графу 13:  $1,54 + 0,01 = 1,55$ . И так далее до получения максимального значения величины  $V_{ок}$ .

Если продолжать расчет дальше, то получаемые объемы будут уменьшаться. Поэтому, полученная наибольшая величина объема и представляет собой искомый полезный объем водохранилища плюс мертвый объем.

Поэтому заканчивается расчет «ходом назад». Возвращаемся к исходному пункту (моменту опорожнения) и продолжается расчет «ходом вперед», т.е. вычитаются недостатки и потери и прибавляются избытки. В нашем случае:  $0,23 + 5,90 = 6,13$ ;  $(6,13 + 0,23) / 2 = 3,18$ ;  $6,13 - 0,02 = 6,11$ . Если в графах 6 или 13 получается значение большее, чем  $12,03$ , то записывается все равно  $12,03$ .

Далее рассчитываются сбросы по формуле

$$R = V_{ок} + (W - \sum q) - V_{max\text{ раб.}} - W_n.$$

$$R_1 = 6,11 + 10,20 - 12,03 - 0,10 = 4,18 \text{ млн.м}^3;$$

$$R_2 = 12,03 + 0,74 - 12,03 - 0,14 = 0,60 \text{ млн.м}^3.$$

По результатам расчета проводится проверка

$$\sum W = \sum q + \sum W_n + \sum R$$

$$23,00 = 17,28 + 0,94 + 4,78$$

$$23,00 = 23,00$$

и рассчитывается полезный объем водохранилища

$$V_{плз} = V_{плн} - V_{мо} = 12,03 - 0,23 = 11,80 \text{ м}^3.$$

Таблица Расчет водохранилища сезонно-годового регулирования стока с учетом потерь по второму способу

Месяцы	Объем, млн.м <sup>3</sup>		Разность		Предварительный объем V <sub>пред.</sub> , млн.м <sup>3</sup>	Расчетный объем V <sub>расч.</sub> , млн. м <sup>3</sup>	Площадь зеркала F, млн.м <sup>2</sup>	Доп. испарение Z <sub>доп.</sub> , мм	Объем потерь, млн.м <sup>3</sup>			Окончат. объем V <sub>ок.</sub> , млн.м <sup>3</sup>	Сброс R, млн.м <sup>3</sup>
	Приток W	Потребле-ние, Σq	Избытки +	Недостатки -					на испарение Wz	на фильтрацию Wф	всего Wп		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
					0,23							0,23	
III	7,34	1,44	5,90		6,13	3,18	0,68	-9	-0,01	0,03	0,02	6,11	
IV	11,64	1,44	10,20		12,03	9,07	1,26	4	0,01	0,09	0,10	12,03	4,18
V	2,18	1,44	0,74		11,88	12,03	1,58	11	0,02	0,12	0,14	12,03	0,60
VI	0,73	1,44		0,71	11,03	11,53	1,51	19	0,03	0,12	0,15	11,17	
VII	0,18	1,44		1,26	9,65	10,40	1,37	28	0,04	0,10	0,14	9,77	
VIII	0,05	1,44		1,39	8,17	8,96	1,17	26	0,03	0,09	0,12	8,26	
IX	0,05	1,44		1,39	6,71	7,48	0,97	17	0,02	0,07	0,09	6,78	
X	0,10	1,44		1,34	5,32	6,04	0,84	9	0,01	0,06	0,07	5,37	
XI	0,21	1,44		1,23	4,06	4,71	0,77	2	0,00	0,05	0,05	4,09	
XII	0,29	1,44		1,15	2,89	3,49	0,72	0	0,00	0,03	0,03	2,91	
I	0,10	1,44		1,34	1,54	2,22	0,63	0	0,00	0,02	0,02	1,55	
II	0,13	1,44		1,31	0,23	0,89	0,38	0	0,00	0,01	0,01	0,23	
Σ	23,00	17,28									0,94		4,78

[Вернуться в оглавление](#)

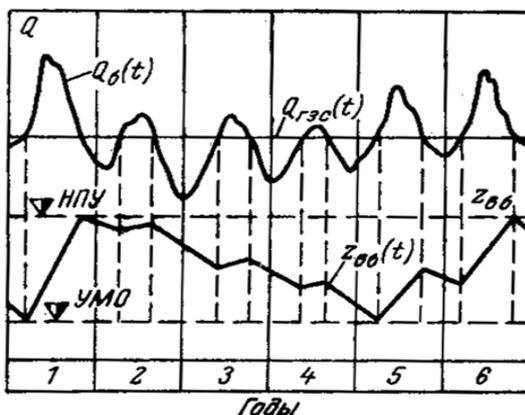
## Лекция 15 Многолетнее регулирование стока.

Цикл регулирования длится несколько лет. Водохранилище наполняется избыточным стоком одного или нескольких многоводных лет и опорожняется в течение ряда маловодных лет. При этом регулировании уровень водохранилища в конце маловодного года будет всегда ниже, чем в начале его. Таким образом, *многолетнее регулирование сводится к увеличению стока маловодных лет*. Особенностью этого вида регулирования является непостоянство продолжительности цикла регулирования. При неизменном расходе водохранилища период наполнения и период опорожнения водохранилища определяются исключительно гидрологической обстановкой каждого года. Чем больше при этом относительный объем водохранилища, тем, очевидно, реже оно заполняется до отметки НПУ.

При многолетнем регулировании, так же как и при годовом, имеется возможность увеличить гарантированную мощность ГЭС и вырабатываемую ею энергию (за счет практически полного устранения бесполезных сбросов воды во время половодья) по сравнению с ГЭС годового и краткосрочного регулирования. Само собой разумеется, что и в этом случае водохранилище может осуществлять любое менее длительное регулирование.

Считается, что для того, чтобы водохранилище могло осуществлять многолетнее регулирование, его объем должен составлять не менее 30—50% среднего за многолетний период объема годового стока реки, т. е.  $\beta_{\text{МН}}=0,3-0,5$ . Указанные довольно широкие пределы колебаний значений  $\beta_{\text{МН}}$  объясняются, так же как и в предыдущем случае, характером изменчивости стока (чем больше значение  $C_v$ , тем больше  $\beta_{\text{МН}}$ ).

На рисунке представлены общая схема многолетнего регулирования и график изменения уровня верхнего бьефа. Как видно, период наполнения в зависимости от водности лет может быть различным. В начале регулирования водохранилище было заполнено в первый же год, а после сработки на это потребовалось уже два года (менее многоводных, чем первый год).



Эффективность длительного регулирования оценивается с помощью коэффициента регулирования  $\alpha$ , представляющего собой отношение зарегулированного расхода или расхода ГЭС к среднемноголетнему расходу реки (норме):  $\alpha = Q_{\text{РЕГ}} / Q_0$

Так как зарегулированный расход обычно не является величиной постоянной, то при определении коэффициента  $\alpha$  он берется как среднее значение за период опорожнения водохранилища, т. е. за маловодный период при годовом регулировании или за аналогичный период, состоящий из нескольких лет при многолетнем регулировании.

Таким образом, при длительном регулировании уменьшается многолетняя и годовая неравномерность расхода, в то время как при краткосрочном регулировании неравномерности расхода за регулируемый период (сутки, неделя) резко возрастает.

Многолетнее регулирование стока заключается в перераспределении стока из многоводных в маловодные сезоны. Величина полезной ёмкости водохранилища складывается из двух:

$$V_{\text{полезн}} = V_{\text{мн}} + V_{\text{сез}} \text{ (многолетняя ёмкость + сезонная)}$$

Коэффициент регулирования

$$\alpha = \frac{\sum q_{\text{бр}}}{W}$$

где  $\sum q_{\text{бр}}$  величина потребления с учётом потерь,  $W$  – средний многолетний объём стока.

Коэффициент многолетней ёмкости

$$\beta_{\text{мн}} = \frac{V_{\text{мн}}}{W}$$

Коэффициент сезонной ёмкости

$$\beta_{\text{сез}} = \frac{V_{\text{сез}}}{W}$$

### Метод Кринского-Менкеля

Пусть задан стокосый ряд состоящий из модульных коэффициентов  $k_1, k_2, \dots, k_n$ . Задана величина  $\alpha$ , если  $k_i > \alpha$ , то имеет место избыток стока относительно потребления, при обратном соотношении имеет место дефицит.

Поскольку максимального стока недостаточно для покрытия потребления, организуют группировки маловодных лет.

Рассчитываются максимальные дефициты и по ним определяется многолетняя ёмкость водохранилища.

Второй метод заключается в определении с помощью специальных номограмм.

Сезонная ёмкость водохранилища позволяет учесть неравномерность внутригодового хода стока. Используется 2 метода: графический и аналитический. Графический с использованием графиков.

Аналитический метод:  $\beta_{\text{сез}} = \alpha(t_m - m_m)$

где  $t_m$  – длительность межени в долях года;  $m_m$  – доля среднего стока межени в среднем годовом стоке.

$$V_{\text{сез}} = \beta_{\text{сез}} \cdot W$$

[Вернуться в оглавление](#)

## Лекция 16 Регулирования паводочного стока. Компенсирующее и каскадное регулирование стока.

Регулирование паводочного стока производится с целью уменьшения максимальных расходов воды, пропускаемых в нижний бьеф сооружений. Этим достигается уменьшение размеров водопропускных устройств и предотвращаются наводнения на участках рек, расположенных ниже регулирующих водохранилищ.

### Компенсирующее и каскадное регулирование стока

**Компенсирующее регулирование.** В некоторых схемах использования энергии по ряду причин приходится располагать ГЭС ниже по течению на значительном расстоянии от регулирующего стока водохранилища. При этом между ГЭС и водохранилищем может иметься большой приток, неблагоприятно влияющий своей неравномерностью на зарегулированный сток (рисунок). Неравномерность притока можно компенсировать соответствующими попусками из водохранилища 1, имеющего для этого необходимый объем. При такой схеме в период меженных расходов попуски из водохранилища увеличивают, а в период половодья уменьшают или прекращают.

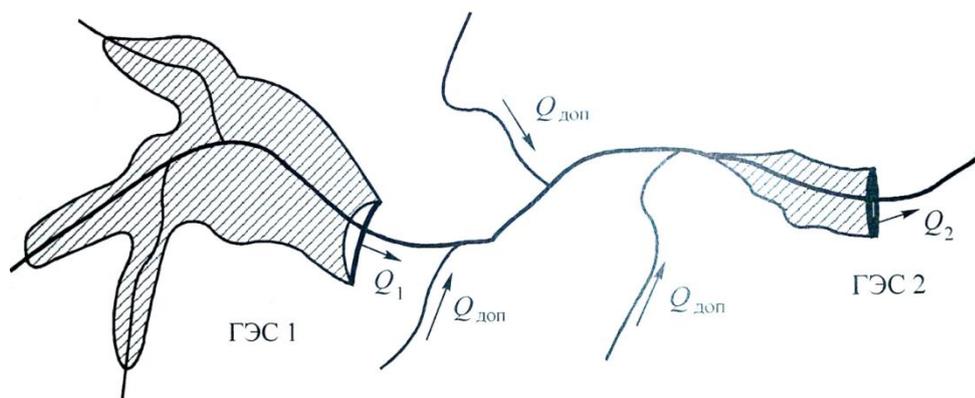


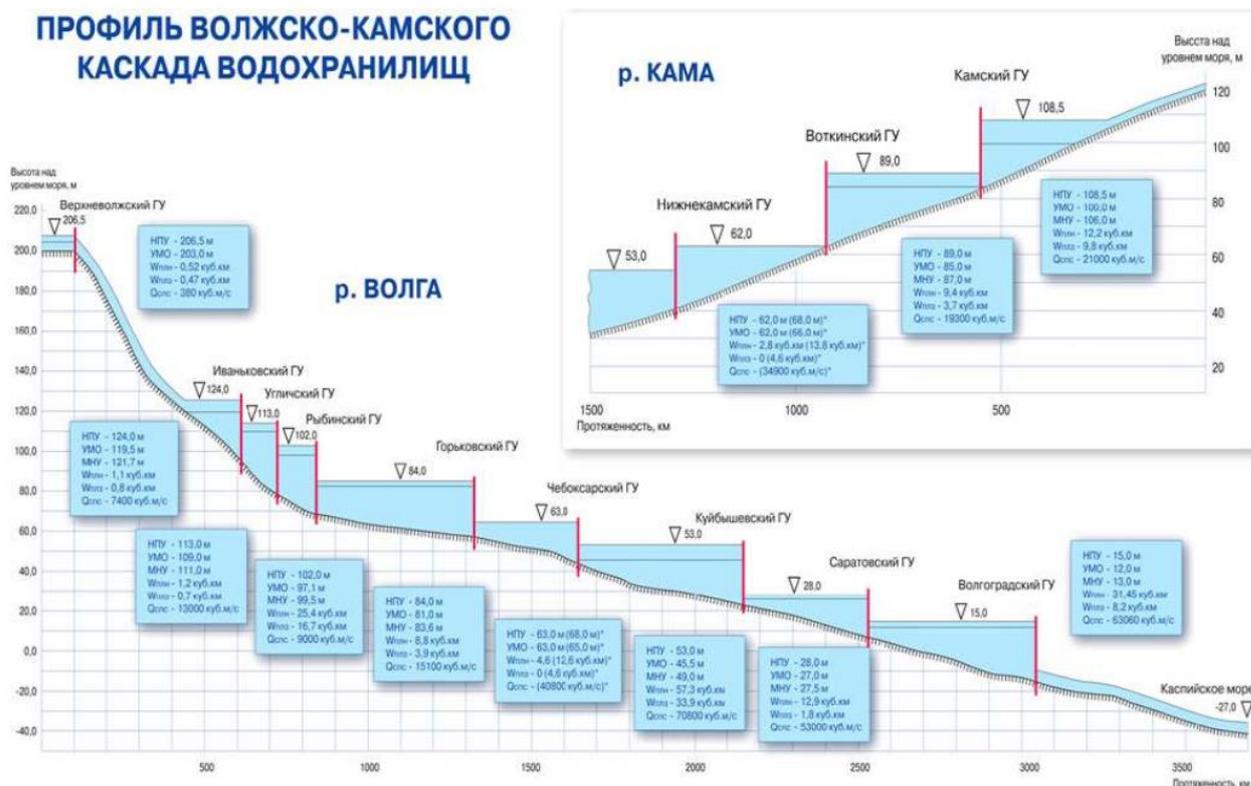
Рисунок Компенсирующее регулирование стока

Имеются схемы компенсирующего регулирования для выравнивания выработки электроэнергии гидроэлектростанциями, расположенными на разных водотоках, имеющих между собой определенное несовпадение во времени (асинхронность) стоковых режимов. Такие ГЭС не связаны между собой гидравлически, но, работая на одну систему, оказываются связанными электрически. Такая связь ГЭС по условиям работы определяет так называемое межбассейновое компенсирующее регулирование. При таком регулировании ГЭС, имеющие относительно небольшие водохранилища, работают по режиму, определяемому собственным стоком и возможностями собственных водохранилищ (компенсируемые ГЭС). Те же ГЭС, которые

обладают водохранилищами с большими регулирующими возможностями (ГЭС — компенсаторы), дополняют выработку компенсирующих ГЭС до значения, определяемого потребностями системы. ГЭС могут быть связаны и снабжением водой одного и того же потребителя.

В описанной схеме (рисунок) водохранилище 2 может служить некоторым буфером для сглаживания всяких неточностей в определении времени добега расхода из верхового водохранилища 1 до ГЭС. Тогда водохранилище 1 осуществляет сравнительно грубое регулирование, а буферное водохранилище 2 более точное, определяемое режимом нагрузки потребителей. Такое регулирование носит название буферного.

**Каскадное регулирование.** Каскадная схема использования водотока осуществляется, как правило, при комплексном использовании водных ресурсов. Это позволяет осуществить не только наиболее полную утилизацию ресурсов, но и наиболее экономичную. При этом отдельные ступени каскада, будучи связаны общим водным режимом, могут также иметь связь гидравлическую, водохозяйственную и электрическую. Практически такого рода связи никогда не проявляются индивидуально, а всегда в различном сочетании друг с другом.



Характер каскадного регулирования будет прежде всего зависеть от размера водохранилищ верхних ступеней. Чем больше их относительный объем, тем большую степень зарегулированности стока они создают, т. е. более зарегулированный сток будет поступать на все нижележащие ГЭС

каскада. Это, разумеется, не исключает перерегулировку ими расходов, поступающих от вышележащих ГЭС.

Целью каскадного регулирования является обеспечение оптимального режима сработки и наполнения водохранилищ каскада по заданному критерию экономической эффективности.

### **Эксплуатация водохранилищ.**

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

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

Проводят санитарную очистку территории населенных пунктов, животноводческих ферм, промышленных предприятий и мест массового загрязнения (свалки, скопления навоза, бытовых отходов и т.п.), попадающих в зоны воздействия водохранилищ; перенос кладбищ и скотомогильников.

На территории населенных пунктов, попадающих в зону затопления, удаляют все сооружения и объекты, возвышающиеся над землей более чем на 50 см. Строительный мусор и другие остатки сжигают, металлический лом вывозят за пределы водохранилища.

Кроме указанных мероприятий при санитарной подготовке водохранилища для охраны грунтовых вод от загрязнения закрывают (тампонируют) все артезианские, геологоразведочные и другие скважины. Строят очистные сооружения коммунальных и промышленных предприятий. Запрещают сброс в водохранилище неочищенных сточных вод и твердых отходов.

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

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

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

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

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

**Эксплуатацию** водохранилищ подразделяют на *техническую эксплуатацию плотины* и ее сооружений и *эксплуатацию водоема*. Мероприятия по технической эксплуатации включают:

- подготовку плотины и водосливных сооружений к пропуску весенних талых и ливневых вод;
- проведение режимных наблюдений и регулирование уровней, а следовательно, и объемов воды в водохранилище согласно гидрологическим и хозяйственным прогнозам и потребностям;
- аварийный, профилактический, текущий и капитальный ремонты плотины и сооружений.

Перед пропуском паводковых вод должны быть проведены следующие работы:

- выявлен прогноз ожидаемого паводка и возможные сроки его прохождения в данном водном бассейне;
- подготовлены мешки с землей, хворост, пиломатериалы, колья, пластыри, карьеры и резервы земли (на случай подсыпки гребня, мокрого и сухого откосов при опасности их разрушения, а также насыпки бермы при вспучивании сухого откоса), запас взрывчатки (для ликвидации заторов льда у входных отверстий водосливных сооружений), рабочий инвентарь;
- с осени и рано весной, пока водохранилище не заполнено водой, тщательно отремонтированы откосы плотин и их покрытия, заделаны швы между железобетонными и бетонными плитами, продольные и поперечные трещины в теле плотины, оправлена и восстановлена каменная отмостка, проверены состояние гребня, работа фильтра, щитовых и подъемных

устройств водосливных сооружений, исправлены дефекты в понуре, флютбете и рисберме, отремонтированы водоочистные колодцы гидротехнических сооружений и др. Во избежание разрушения сухого откоса ливневыми дождями систематически скашивают травостой, восстанавливают кюветы, сбросные каналы и лотки;

– организовано круглосуточное дежурство, создана бригада по пропуску паводковых вод, выделено необходимое число самосвалов, скреперов, бульдозеров и экскаваторов, установлена бесперебойная телефонная связь с водохозяйственными и другими районными и областными организациями.

Режимные наблюдения за уровнями и объемами воды в водохранилище позволяют:

- подавать воду на орошение и водоснабжение ферм в соответствии с графиками потребления воды;
- выявлять резервы воды для проведения осенних влагозарядковых поливов;
- изменять регулируемую вместимость водохранилища с учетом гидрологических прогнозов, а при опасности паводка сбрасывать излишки воды.

В период эксплуатации следует выполнять и **профилактический ремонт**. Он заключается в проведении защитных мероприятий, исключающих появления тех или иных деформаций в сооружениях.

**Текущий ремонт** осуществляют каждый год по заранее составленному графику. Он включает замену отдельных частей сооружений в связи с износом материала, а также ликвидацию дефектов, обнаруженных после сдачи объекта в эксплуатацию.

**Капитальный ремонт** выполняют строительные организации при необходимости устранения серьезных и крупных повреждений, реконструкции узла сооружений, вызванной изменением проектных размеров или коренной перестройкой плотины.

К хозяйственным эксплуатационным мероприятиям относятся:

- залужение и восстановление травостоя в защитной полосе вдоль водохранилища;
- очистка нагорных каналов и ремонт водосливных сооружений;
- уход за древесными и кустарниковыми насаждениями вдоль водохранилища и в верховьях впадающих балок, а также устройство запруд в местах, опасных в противоэрозионном отношении;

- сгребание и сжигание листьев и другого опада древесных насаждений во избежание засорения водохранилища;

- установление мест скотопрогона и подготовка специальных площадок для водопоя скота. Во избежание загрязнения водохранилища площадки для водопоя скота устраивают ниже плотины, в местах водовыпускных сооружений;

- предохранение водохранилища, особенно мелких мест, от зарастания и восстановление разрушенных откосов. Для борьбы с зарастанием используют механические и биологические средства (разведение травяной рыбы, толстолобика и амура);

- зарыбление водохранилища ценными породами рыбы (каarp, лещ, линь и др.). При разведении рыбы пускают по 400-500 годовиков (сеголеток) на 1 га поверхности воды;

- разведение водоплавающей птицы. При разведении гусей вдоль водохранилища оставляют залуженные места;

- оборудование помоста и подъездных путей для забора воды или места для насосной установки с подводным трубопроводом в случае использования водохранилища для тушения пожара.

[Вернуться в оглавление](#)

**2 Практический раздел.**  
Материалы для проведения практических занятий

## Практическая работа №1

**Тема:** Определение нормы годового стока при наличии данных наблюдений.

**Цель работы:** Определить норму годового стока при наличии данных гидрометрических наблюдений.

### Краткие сведения из теории

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.

При наличии данных гидрометрических наблюдений согласно ТКП 45-3.04-168-2009 «Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения» норма годового стока определяется по формуле:

$$\bar{Q} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (1.1)$$

где  $\bar{Q}$  – норма годового стока, м<sup>3</sup>/с;  $Q_i$  – годовые значения стока за длительный период ( $n$ , лет), при котором дальнейшее увеличение ряда наблюдений не меняет или мало меняет среднюю арифметическую величину  $\bar{Q}$ .

Продолжительность периода считается достаточной, если рассматриваемый период репрезентативен (представителен), а величина средней квадратической ошибки нормы стока не превышает 10%. При невыполнении этих условий расчетный ряд считается недостаточным и его необходимо привести к многолетнему периоду с привлечением реки-аналога

Средняя квадратическая ошибка нормы стока определяется:

$$\delta_{\bar{Q}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

где  $C_v$  – коэффициент изменчивости (вариации) ряда годовых величин стока за  $n$  лет, определяемый по формуле

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (1.3)$$

где  $K_i$  – модульный коэффициент, определяемый по формуле

$$K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}} \quad (1.4)$$

## Ход выполнения работы

Требуется определить норму годового стока для р. Западная Двина - г. Полоцк. Исходный ряд наблюдений дан в таблице 1.1.

*Таблица 1.1 Годовые расходы воды ( $Q_i$ ) р. Западная Двина - г. Полоцк за 1947-1981 гг.*

№ члена ряда	1	1	2	3	4	5	6	7	...	33	34	35
Год	2	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	...	1979	1980	1981
$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	3	323	279	256	332	265	313	448	...	259	305	305

По формуле 1.1 определяется норма годового стока

$$\bar{Q} = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} = \frac{10290}{35} = 294 \text{ м}^3/\text{с}$$

По формуле 1.2 необходимо рассчитать относительную среднюю квадратическую ошибку.

При нахождении ошибки, требуется определить коэффициент изменчивости ( $C_v$ ). Расчет вычисления  $C_v$  заполняется в таблице 1.2

*Таблица 1.2 Определение коэффициента изменчивости на р. Западная Двина - г. Полоцк*

№ п/п	Годы	$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	$K_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$	$K_i - 1$	$(K_i - 1)^2$
1	2	3	4	5	6
1	1947	323	1,1	0,10	0,010
2	1948	279	0,95	-0,05	0,003
3	1949	256	0,87	-0,13	0,017
...	...	...	...	...	...
33	1979	259	0,88	-0,12	0,014
34	1980	305	1,04	0,04	0,001
35	1981	305	1,04	0,04	0,001
Сумма		10290			1,511
Среднее		294			

По формуле 1.3 определяется коэффициент изменчивости

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1,511}{35 - 1}} = 0,21$$

Средняя квадратическая ошибка

$$\delta_{\bar{Q}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100\% = \frac{0,21}{\sqrt{35}} \cdot 100\% = 3,55\%$$

Величина средней квадратической ошибки нормы стока 3,55% не превышает 10%, следовательно, период считается достаточным (репрезентативным) и не требуется продление ряда.

[Вернуться в оглавление](#)

## Практическая работа №2

**Тема:** Определение нормы годового стока при недостаточности данных наблюдений.

**Цель работы:** Определить норму годового стока при недостаточности данных гидрометрических наблюдений.

### *Краткие сведения из теории*

При недостаточности данных гидрометрических наблюдений осуществляется приведение статистических параметров стока в расчетном створе к многолетнему периоду с привлечением данных соседних рек-аналогов, имеющих сравнительно длительный, т. е. репрезентативный, период наблюдений. Оно основывается на статистической (регрессионной) связи параметров стока соседних рек, имеющих сходные физико-географические характеристики водосборов.

Основные критерии подбора реки-аналога

$$R \geq 0,7; n' \geq 10, \quad (2.1)$$

где  $R$  – коэффициент корреляции между величинами стока исследуемой (расчетной) реки и реки-аналога,  $n'$  – число лет совместных наблюдений.

*Коэффициент корреляции*  $R$  – мера тесноты связи между рассматриваемыми характеристиками (переменными). Частный коэффициент корреляции изменяется в пределах от  $-1$  до  $1$ , чем ближе к единице, тем теснее связь.

*Коэффициент автокорреляции*  $r(\tau)$  – характеризует связь ряда гидрологических величин с этим же рядом, сдвинутым на некоторый интервал времени  $\tau$ . Коэффициент автокорреляции позволяет судить о случайности и независимости значений характеристики ряда. Значения  $r(\tau) \leq 0,2$  считаются несущественными.

После подбора реки-аналога производится восстановление значений стока для расчетной реки различными методами.

Ряд наблюдений по реке-аналогу берем из нормативно-справочного материала.

*Таблица 2.1 Годовые расходы воды ( $Q_i$ ) р. Западная Двина - г. Полоцк за 1947-1981 гг.*

№ члена ряда	1	1	2	3	4	5	6	7	...	33	34	35
Год	2	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	...	1979	1980	1981
$Q_i, \text{ м}^3/\text{с}$	3	323	279	256	332	265	313	448	...	259	305	305

Для продления короткого ряда наблюдений по исследуемой реке, при аналитическом методе, подсчитывается коэффициент корреляции и

параметры уравнения регрессии (таблица 2.2). Используется два метода продления: аналитический (по уравнению регрессии) и графический (по графику связи).

Таблица 2.2 Определение коэффициента корреляции и параметров уравнения регрессии.

№ пп	Годы	Расходы воды, м <sup>3</sup> /с		$\Delta y = y_i - \bar{y}$	$\Delta x = x_i - \bar{x}$	$\Delta y^2$	$\Delta x^2$	$\Delta y \cdot \Delta x$
		Q (y)	Q <sub>A</sub> (x)					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1947	0,90	323	-0,42	7,00	0,180	49,000	-2,966
2	1948	1,06	279	-0,26	-37,0	0,070	1369,000	9,756
3	1949	1,13	256	-0,19	-60,0	0,038	3600,000	11,621
...	...	...	...	...	...	...	...	...
17	1963	1,16	209	-0,16	-107	0,027	11449,000	17,514
18	1964	0,90	187	-0,42	-129	0,180	16641,000	54,655
19	1965	1,23	263	-0,09	-53,0	0,009	2809,000	4,965
Сумма		25,08	6004	0,00	0,00	4,317	133465,79	585,953
Среднее		1,32	316					

Определяются средние квадратические отклонения рядов:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{133465,79}{18}} = 86,11; \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{4,317}{18}} = 0,49. \quad (2.3)$$

Коэффициент корреляции

$$R = \frac{\sum [(y_i - \bar{y}) \cdot (x_i - \bar{x})]}{\sqrt{\sum \Delta x^2 \cdot \sum \Delta y^2}} = \frac{585,953}{\sqrt{133465,79 \cdot 4,317}} = 0,772. \quad (2.4)$$

Вероятная ошибка коэффициента корреляции

$$E_p = \pm 0,674 \cdot \frac{1-R^2}{\sqrt{n}} = \pm 0,674 \cdot \frac{1-0,772^2}{\sqrt{19}} = \pm 0,062. \quad (2.5)$$

Наиболее вероятное значение коэффициента корреляции  $R = 0,772 \pm 0,062$ .

Коэффициент регрессии, представляющий тангенс угла наклона линии связи к оси абсцисс, определяется по формуле

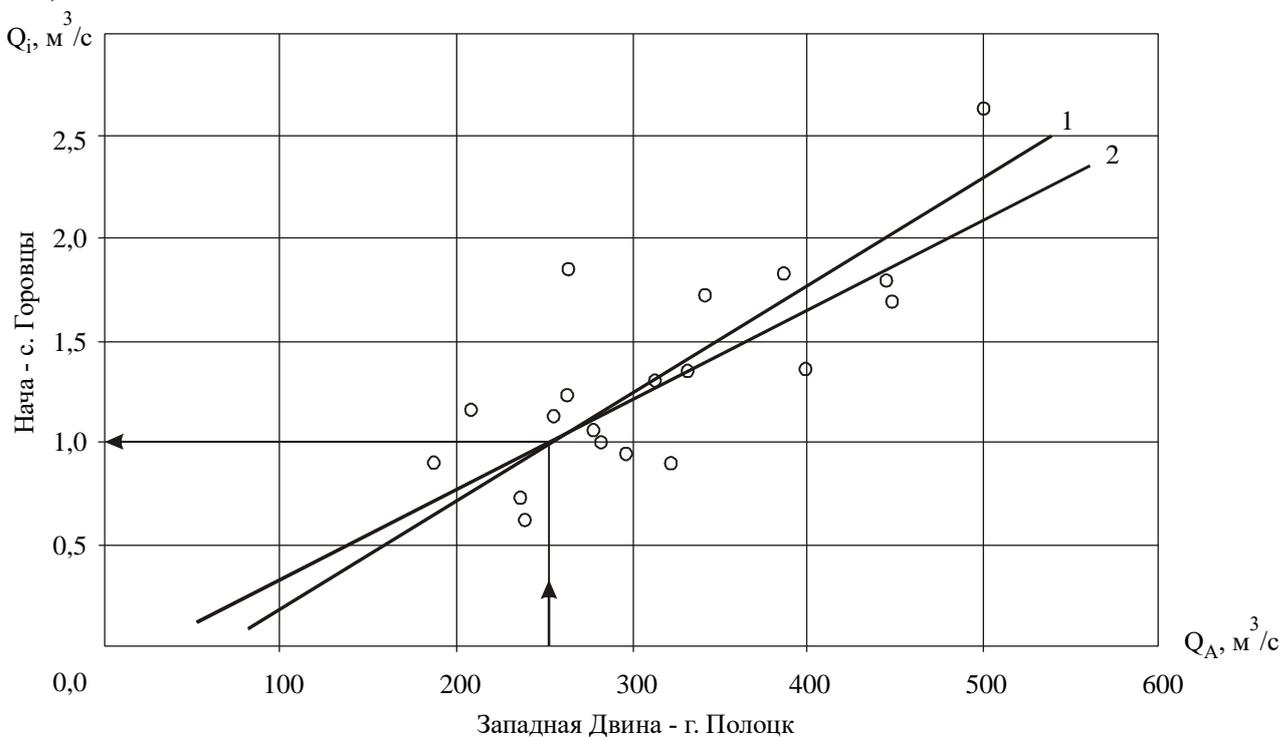
$$K_{y/x} = R \cdot \frac{\sigma_y}{\sigma_x} = 0,772 \cdot \frac{0,49}{86,11} = 0,0044. \quad (2.6)$$

Уравнение прямой регрессии

$$\begin{aligned} (Q - \bar{Q}) &= K_{y/x} \cdot (Q_A - \bar{Q}_A); \\ (Q - 1,32) &= 0,0044 \cdot (Q_A - 316); \\ Q &= 0,0044 \cdot Q_A - 0,07. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Для проверки правильности расчета строится прямая по уравнению прямой регрессии (рисунок 2.1).

При продлении ряда графическим методом строится график связи, по таблице 2.2, расходов исследуемой реки с расходами реки-аналога (рисунок 2.1).



*Рисунок 2. 1 Графики связи средних годовых расходов воды р.Западная Двина-г.Полоцк и р.Нача-с.Горовицы: 1 – графический метод; 2 – аналитический метод.*

Приведение исходного ряда к длительному периоду наблюдения осуществляется по двум методам: графическому – значения расходов воды снимаются по графику, с использованием расходов реки-аналога; аналитическому – значения расходов воды определяются по уравнению прямой регрессии, с использованием расходов реки-аналога. Результаты сводятся в таблицу 2.3. При этом в графы 3 и 4 таблицы 2.5 переписываются наблюдаемые значения, а восстановленные значения расходов, по двум методам, берутся в скобки.

Таблица 2.3 Восстановленные и наблюдаемые расходы воды

№ пп	Годы	$Q_A, \text{м}^3/\text{с}$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$ (по графику)	$Q, \text{м}^3/\text{с}$ (по уравнению)
1	2	3	4	5
1	1947	323	0,90	0,90
2	1948	279	1,06	1,06
3	1949	256	1,13	1,13
...	...	...	...	...
33	1979	259	(1,00)	(1,07)
34	1980	305	(1,30)	(1,27)
35	1981	305	(1,30)	(1,27)
Среднее		294	1,27	1,22

Для дальнейших расчетов принимается гидрологический ряд расходов из графы 5 таблицы 2.3. Норма стока при этом составит  $\bar{Q} = 1,22 \text{ м}^3/\text{с}$ .

[Вернуться в оглавление](#)

### Практическая работа №3

**Тема:** Определение статистических параметров вариационного стокового ряда. Построение теоретической кривой обеспеченности годового стока.

- Цель работы:**
- 1) Определить статистические параметры вариационного стокового ряда различными методами.
  - 2) Построить эмпирическую и теоретические кривые обеспеченности.
  - 3) Найти величину годового стока заданной вероятности превышения (обеспеченности).

#### Краткие сведения из теории

При водохозяйственном использовании реки необходимо знать не только среднюю величину (норму стока), но и сток различной вероятности превышения (обеспеченности), т.е. возможные его колебания на весь запланированный период службы сооружения.

Для определения годового стока различной вероятности превышения используются кривые распределения или обеспеченности. В общем случае, если рассматривать изменяющийся (вариационный) стоковый ряд, вид кривой обеспеченности зависит от следующих статистических параметров ряда: средней арифметической величины ряда (нормы стока  $\bar{Q}$ ), коэффициента вариации ( $C_v$ ) и коэффициента асимметрии ( $C_s$ ).

*Коэффициент вариации* (изменчивости) ( $C_v$ ) – безразмерный статистический параметр, характеризующий изменчивость гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения.

*Коэффициент асимметрии* ( $C_s$ ) – безразмерный статистический параметр, характеризующий степень несимметричности распределения ряда рассматриваемой гидрометеорологической величины относительно ее среднего значения.

Для построения эмпирических (по данным наблюдений) кривых обеспеченности необходимо определить обеспеченность каждого члена стокового ряда. *Ежегодная вероятность превышения (обеспеченность) расхода воды ( $P, \%$ )* – это вероятность появления расхода равного или превышающего заданное значение. Определяется по формуле

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

где  $m$  – порядковый номер членов ряда соответствующей гидрологической характеристики, расположенной в убывающем порядке;  $n$  – общее число членов ряда. Чем больше вероятность превышения, тем меньше значение гидрометеорологической характеристики и наоборот.

От обеспеченности можно перейти к *вероятной повторяемости в годах* ( $N$ ) расхода равного или превышающего заданный, используя следующие формулы:

$$\text{при } P \leq 50\% \quad N = \frac{100}{P}; \quad (3.2)$$

$$\text{при } P \geq 50\% \quad N = \frac{100}{100 - P}. \quad (3.3)$$

Если по формуле (3.1) вычислить обеспеченность всех членов ряда, расположенных в убывающем порядке, можно по полученным значениям обеспеченности и соответствующим им значениям расходов воды построить эмпирическую кривую обеспеченности. Однако, из-за отсутствия длительных рядов наблюдений, такая кривая не позволяет определить расходы воды редкой повторяемости (1 раз в 100, 500, 1000 лет). Эмпирическую кривую необходимо экстраполировать в верхней и нижней частях значений обеспеченности. Для этой цели используются *теоретические кривые распределения*: трехпараметрического гамма-распределения и распределение Пирсона III типа.

Для построения теоретических кривых необходимо вычислить коэффициент вариации ( $C_v$ ) и асимметрии ( $C_s$ ) по которым рассчитываются ординаты теоретических кривых.

При наличии длительных рядов данных однородных гидрометрических наблюдений СНиП 2.01.14-83 предусматривает следующие методы определения этих коэффициентов: *метод наибольшего правдоподобия, метод моментов, графоаналитический метод Г.А.Алексеева.*

### **Ход выполнения работы**

#### **Метод наибольшего правдоподобия**

Применяется при любой изменчивости стока. Значения годового расхода воды ( $Q_i$ ) располагаются в убывающем порядке, и определяется эмпирическая ежегодная вероятность превышения по формуле (3.1). Рассчитываются модульные коэффициенты ( $k_j$ ), а также ( $lgk_j$ ) и произведения ( $k_j \cdot lgk_j$ ). Результаты расчетов записываются в таблицу 3.1.

По данным таблицы 3.1 на клетчатку вероятности (рисунок 3.1) наносятся эмпирические точки (графы 4 (б) и 5 таблицы 3.1), и строится сглаженная эмпирическая кривая обеспеченности.

Определяется среднее многолетнее значение расхода воды

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} = \frac{41,80}{35} = 1,19 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.4)$$

Таблица 3.1 Параметры кривой распределения годового расхода воды ( $Q_j$ ), рассчитанные методом наибольшего правдоподобия

№ члена ряда	Год	$Q_i$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_{i\text{убыв.}}$ , м <sup>3</sup> /с	P, %	$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}$	lg $k_i$	$k_i \cdot \lg k_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1947	0,90	2,63	2,78	2,21	0,344	0,760
2	1948	1,06	1,84	5,56	1,55	0,190	0,295
3	1949	1,13	1,82	8,33	1,53	0,185	0,283
...	...	...	...	...	...	...	...
33	1979	1,00	0,72	91,67	0,61	-0,215	-0,059
34	1980	1,25	0,65	94,44	0,55	-0,260	-0,091
35	1981	1,25	0,62	97,22	0,52	-0,284	-0,111
Сумма		41,80			35,12	-0,808	0,927
Среднее		1,19					

Затем вычисляются суммы  $\sum_{i=1}^n \lg k_i = -0,808$ ,  $\sum_{i=1}^n k_i \cdot \lg k_i = 0,927$ , для вычисления статистик  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , которые рассчитываются по формулам

$$\lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \lg k_i}{n-1} = \frac{-0,808}{34} = -0,024; \quad \lambda_3 = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \cdot \lg k_i}{n-1} = \frac{0,927}{34} = 0,027. \quad (3.5)$$

По специальным номограммам (приложение Е) [2], в соответствии с вычисленными статистиками ( $\lambda_2$ ) и ( $\lambda_3$ ), определяется коэффициент вариации  $C_v=0,36$ , отношение  $C_s/C_v=4,0$ . Далее, по этим параметрам и  $\bar{Q} = 1,19\text{м}^3/\text{с}$ , согласно таблице Ж.1 [2], вычисляются ординаты кривой трехпараметрического гамма-распределения и заносятся в таблицу 3.2.

При попадании точки пересечения значений ( $\lambda_2$ ) и ( $\lambda_3$ ) вне номограммы, используют лишь значение ( $\lambda_2$ ), принудительно опускается это значение на кривую  $C_s=2C_v$  (для Беларуси), и на пересечении находится значение  $C_v$ .

Таблица 2.2 Ординаты аналитической кривой трехпараметрического гамма-распределения

P, %	0,01	0,1	1	5	10	25	50	75	95	99	99,9
$k_p$	3,93	2,99	2,16	1,67	1,46	1,18	0,93	0,75	0,56	0,46	0,37
$Q_p$ , м <sup>3</sup> /с	4,68	3,56	2,57	1,99	1,74	1,40	1,11	0,89	0,66	0,54	0,44

По данным таблицы 3.2 строится аналитическая кривая распределения, и делается вывод о соответствии построенной теоретической кривой с эмпирическими точками (кривой).

Определяются средние квадратические ошибки нормы годового стока и коэффициента вариации без учета автокорреляции по формулам

$$\sigma_{\bar{Q}} = \pm \frac{C_V}{\sqrt{n}} \cdot 100 = \pm \frac{0,36}{\sqrt{35}} \cdot 100 = \pm 6,09\%; \quad (3.6)$$

$$\sigma_{C_V} = \pm \sqrt{\frac{3}{2n \cdot (3 + C_V^2)}} \cdot 100 = \pm \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 35 \cdot (3 + 0,36^2)}} \cdot 100 = \pm 11,70\%. \quad (3.7)$$

Полученная ошибка для нормы стока  $6,09\% < 10\%$  не противоречит условию.

### Метод моментов

Метод моментов является вспомогательным методом. Применяется при изменчивости годового стока  $C_V \leq 0,50$ . Расчет статистических параметров производим в порядке, указанном в таблице 3.3.

*Таблица 3.3 Параметры кривой распределения годового расхода воды, рассчитанные методом моментов*

№ члена ряда	Год	Q <sub>i</sub>	Q <sub>i</sub> убыв	P, %	k <sub>i</sub>	k <sub>i-1</sub>	(k <sub>i-1</sub> ) <sup>2</sup>	(k <sub>i-1</sub> ) <sup>3</sup>
1	2	3	4	6	7	8	9	10
1	1947	0,90	2,63	2,78	2,20	1,20	1,440	1,728
2	1948	1,06	1,84	5,56	1,54	0,54	0,292	0,157
3	1949	1,13	1,82	8,33	1,52	0,52	0,270	0,141
...	...	...	...	...	...	...	...	...
33	1979	1,00	0,72	91,67	0,60	-0,40	0,160	-0,064
34	1980	1,25	0,65	94,44	0,54	-0,46	0,212	-0,097
35	1981	1,25	0,62	97,22	0,52	-0,48	0,230	-0,111
Сумма		41,80			35,01		4,368	1,845

По результатам расчетов (таблица 3.3) определяются суммы:  $\sum_{i=1}^{35} (k_i - 1)^2 = 4,368$ ,  $\sum_{i=1}^{35} (k_i - 1)^3 = 1,845$ ; вычисляются смещенные значения коэффициентов вариации ( $\tilde{C}_V$ ), асимметрии ( $\tilde{C}_S$ ) и средние квадратические ошибки по формулам

$$\tilde{C}_V = \sqrt{\frac{\sum (K_i - 1)^2}{n - 1}} = \sqrt{4,368 / (35 - 1)} = 0,36; \quad (3.8)$$

$$\tilde{C}_S = \frac{n \cdot \sum (K_i - 1)^3}{C_V^3 \cdot (n - 1) \cdot (n - 2)} = \frac{35 \cdot 1,845}{0,36^3 \cdot 34 \cdot 33} = 1,16; \quad (3.9)$$

$$\tilde{C}_S / \tilde{C}_V = \frac{1,16}{0,36} \approx 3,0; \quad (3.10)$$

Если полученное соотношение  $\tilde{C}_S / \tilde{C}_V$  менее 2,0, то для дальнейших расчетов принимается –  $\tilde{C}_S / \tilde{C}_V = 2,0$ .

$$\sigma_{\bar{Q}} = \pm \frac{C_V}{\sqrt{n}} \cdot 100 = \pm \frac{0,36}{\sqrt{35}} \cdot 100 = \pm 6,09\%; \quad (3.11)$$

$$\sigma_{C_v} = \pm \sqrt{\frac{3}{2n \cdot (3 + C_v^2)}} \cdot 100 = \pm \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 35 \cdot (3 + 0,36^2)}} \cdot 100 = \pm 11,70\%. \quad (3.12)$$

Относительная средняя квадратическая ошибка нормы годового расхода воды  $6,09\% < 10\%$  (продолжительность периода  $n=35$  года) считается достаточной.

Расчетные несмещенные значения коэффициентов ( $C_v$ ) и ( $C_s$ ) для биномиального распределения методом моментов определяются по [2], где коэффициенты  $a_1-a_6$  и  $b_1-b_6$  найдены по таблицам 4.1 и 4.2 [2] для соотношения  $C_s/C_v=3$  и коэффициента автокорреляции  $r(1)=0$ :

$$C_v = \left(a_1 + \frac{a_2}{n}\right) + \left(a_3 + \frac{a_4}{n}\right) \cdot \bar{C}_v + \left(a_5 + \frac{a_6}{n}\right) \cdot \bar{C}_v^2 = \\ = \left(0 + \frac{0,69}{35}\right) + \left(0,98 - \frac{434}{35}\right) \cdot 0,36 + \left(0,01 + \frac{6,78}{35}\right) \cdot 0,36^2 = 0,35; \quad (3.13)$$

$$C_s = \left(b_1 + \frac{b_2}{n}\right) + \left(b_3 + \frac{b_4}{n}\right) \cdot \bar{C}_s + \left(b_5 + \frac{b_6}{n}\right) \cdot \bar{C}_s^2 = \\ = \left(0,03 + \frac{2,00}{35}\right) + \left(0,92 - \frac{5,09}{35}\right) \cdot 1,16 + \left(0,03 + \frac{8,10}{35}\right) \cdot 1,16^2 = 1,35; \quad (3.14)$$

По несмещенным параметрам  $C_v=0,35$ ,  $C_s=1,35$  и  $\bar{Q}=1,19 \text{ м}^3/\text{с}$  вычисляются ординаты биномиальной кривой распределения (таблица 3.4) по таблице К.1 [2].

По данным таблицы 3.4 на клетчатке вероятности строится аналитическая кривая биномиального распределения модулей годового стока (рисунок 3.1), с которой снимаются искомые значения годового стока заданной вероятности превышения. Анализируется соответствие построенной теоретической кривой эмпирической.

*Таблица 3.4 Ординаты аналитической кривой биномиального распределения годового стока (для метода моментов)*

Р, %	0,01	0,1	1	5	10	25	50	75	95	99	99,9
$\Phi_p$	6,76	5,02	3,24	1,94	1,34	0,50	-0,21	-0,73	-1,19	-1,35	-1,44
$K_p = \Phi_p C_v + 1$	3,37	2,76	2,13	1,68	1,47	1,18	0,93	0,74	0,58	0,53	0,50
$Q_p = K_p \bar{Q}, \text{ м}^3/\text{с}$	4,01	3,28	2,53	2,00	1,75	1,40	1,11	0,88	0,69	0,63	0,60

**Вывод.** На клетчатке вероятности видно (рисунок 3.1), что наилучшее соответствие точек эмпирических и теоретических кривых наблюдается у кривой трехпараметрического гамма-распределения при  $C_v=0,36$  и  $C_s=4C_v$ . Поэтому определяем расход заданной обеспеченности по теоретической кривой, построенной по методу наибольшего правдоподобия  $Q_{90\%} = 0,74 \text{ м}^3/\text{с}$ . В качестве расчетной выбирается теоретическая кривая, которая ближе всех проходит возле эмпирических точек – это теоретическая кривая, построенная по методу наибольшего правдоподобия.

[Вернуться в оглавление](#)

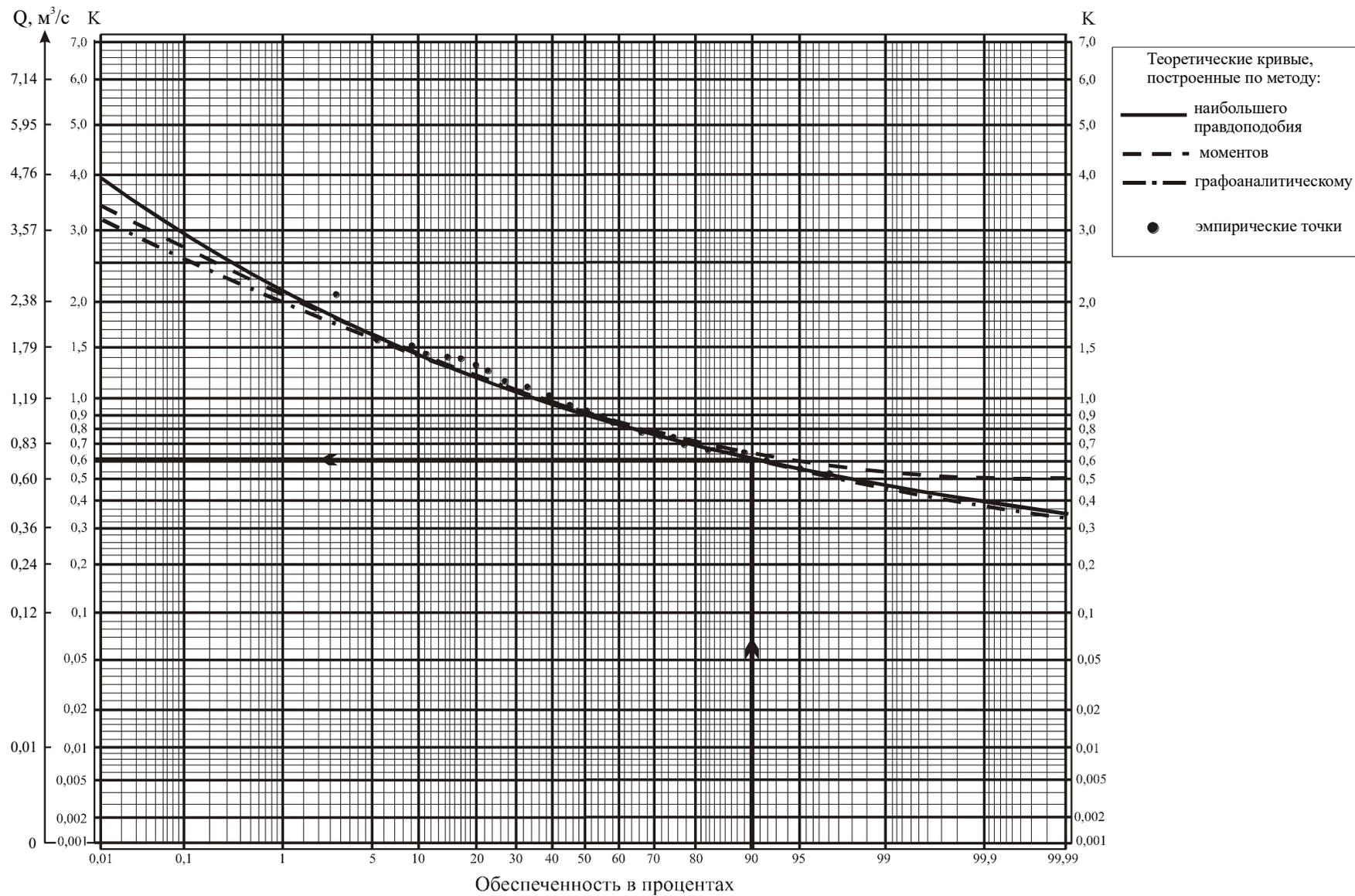


Рисунок 3.1 Кривые распределения годового стока р.Нача-с.Горовцы.

## Практическая работа №4

**Тема:** Расчет внутригодового распределения стока.

**Цель работы:** Рассчитать внутригодовое распределение стока методом реального года.

### Краткие сведения из теории

Для расчета внутригодового стока воды при наличии данных гидрометрических наблюдений за период не менее 15 лет применяются согласно ТКП 45-3.04-168-2009 следующие методы:

- распределения стока по аналогии с распределением реального года;
- компоновки сезонов.

Внутригодовое распределение стока следует рассчитывать по водохозяйственным годам, начиная с многоводного сезона. Границы сезонов назначаются едиными для всех лет с округлением до месяца. Деление года на периоды и сезоны производится в зависимости от преобладающего вида использования стока. Период года и сезон, в которых естественный сток может лимитировать водопотребление, принимаются за лимитирующие период и сезон (рисунок 4.1).

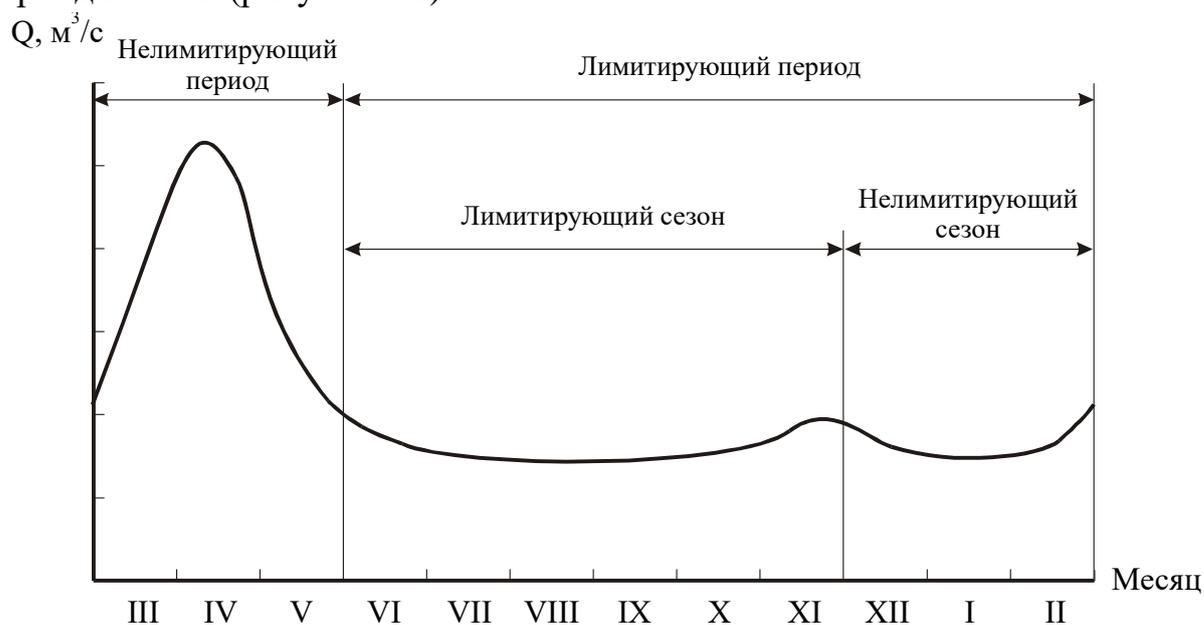


Рисунок 4.1 Средний многолетний гидрограф стока.

### Ход выполнения работы

Для расчета внутригодового распределения стока применяем *метод реального года*. Суть метода – выделить из ряда лет водохозяйственный год наиболее близкий к заданной вероятности превышения как за год так и за лимитирующий период (сезон). Затем, зная процентное распределение месячных расходов внутри этого реального года, по аналогии выполнить внутригодовое распределение для заданного года.

Прежде всего, устанавливается начало и конец сезонов, лимитирующий период и сезон. Проанализировав ход изменения средних месячных расходов, видим, что весна охватывает май-март (многоводный сезон). Лето-осень включает июнь-ноябрь, а зима – декабрь-февраль. Поскольку проектируемое водохранилище на р.Нача-с.Горовцы предназначено для целей гидроэнергетики и водоснабжения, то лимитирующим сезоном будет зима, а лимитирующим периодом – маловодный период, включающий два сезона: лето-осень и зиму.

Таблица 4.1 Суммы средних месячных расходов р.Нача - с.Горовцы за сезоны и год, м<sup>3</sup>/с.

Водохозяйственный год	Весна (III-V)	Лето-осень (VI-XI)	Зима (XII-II)	Сумма (за год)
1	2	3	4	5
1947-1948	7,57	1,46	3,56	12,59
1948-1949	7,29	1,99	1,33	10,61
1949-1950	8,92	2,76	2,21	13,89
...	...	...	...	...
1962-1963	13,36	14,45	3,87	31,68
1963-1964	9,54	2,38	1,50	13,42
1964-1965	8,04	1,34	1,88	11,26

Для выбора реальных лет со стоком за год и сезоны, близким к расчетной (в нашем случае 90%) обеспеченности составляется таблица 4.1, в которую записываются суммы средних месячных расходов воды за все сезоны и год (водохозяйственный, т.е. начинающийся с марта текущего года и заканчивающийся в феврале следующего), и таблицу 4.2, куда выписываются суммы средних месячных расходов воды за год и лимитирующий период (сезоны) в убывающем порядке. В графу 8 таблицы 4.2 записывается вычисленная по формуле (3.1) обеспеченность P, %.

Таблица 4.2 Сумма средних месячных расходов р.Нача - с.Горовцы за сезоны и год в убывающем порядке, м<sup>3</sup>/с.

№ п/п	Год	Q <sub>ср.м.</sub> за год	Год	Q <sub>ср.м.</sub> за лето-осень	Год	Q <sub>ср.м.</sub> за зиму	P, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1962-1963	31,68	1962-1963	14,45	1950-1951	4,64	5,3
2	1956-1957	23,28	1952-1953	10,68	1952-1953	4,07	10,5
3	1951-1952	20,92	1957-1958	8,21	1960-1961	3,88	15,8
...	...	...	...	...	...	...	...
16	1961-1962	10,48	1947-1948	1,46	1953-1954	0,85	84,2
17	<b>1959-1960</b>	9,94	1964-1965	1,34	1951-1952	0,65	<b>89,5</b>
18	1960-1961	9,07	<b>1959-1960</b>	0,57	<b>1959-1960</b>	0,24	94,7

Внутригодовое распределение стока реального года может быть принято в качестве расчетного, если вероятность превышения стока за год и за

лимитирующие период и сезон, а также минимального месячного расхода, близки между собой и соответствуют заданной, по условиям проектирования, вероятности превышения. Анализируя данные таблицы 4.2, приходим к выводу, что наиболее близким к очень маловодному году является 1959-1960 водохозяйственный год (выделенный в таблице 4.2), так как обеспеченность годового стока (89,5%), лимитирующих сезонов лета-осени (94,7%) и зимы (94,7%) наиболее близки к заданной (90%). Этот год и принимается в качестве расчетного.

Распределение стока по месяцам для установленного таким образом маловодного (реального года) показано в таблице 4.3. Используя внутригодовое распределение стока реального года (таблица 4.3), получено внутригодовое распределение стока для расходов заданной обеспеченности (таблица 4.4).

Полученное по клетчатке вероятностей (см. практическая работа №3, рисунок 3.1) значение расхода заданной обеспеченности  $Q_{90\%} = 0,74 \text{ м}^3/\text{с}$ , предварительно умножив его на 12:  $0,74 \cdot 12 = 8,88 \text{ м}^3/\text{с}$  принимают за 100%. Обозначая сток за месяц через  $X$  и, пользуясь данными таблицы 4.3, получаем для III (марта) месяца значение  $X = \frac{8,88 \cdot 31,9}{100} = 2,83 \text{ м}^3/\text{с}$ , которое заносим в таблицу 4.4. Продолжая расчет таким образом, получают необходимые данные для составления таблицы 4.4.

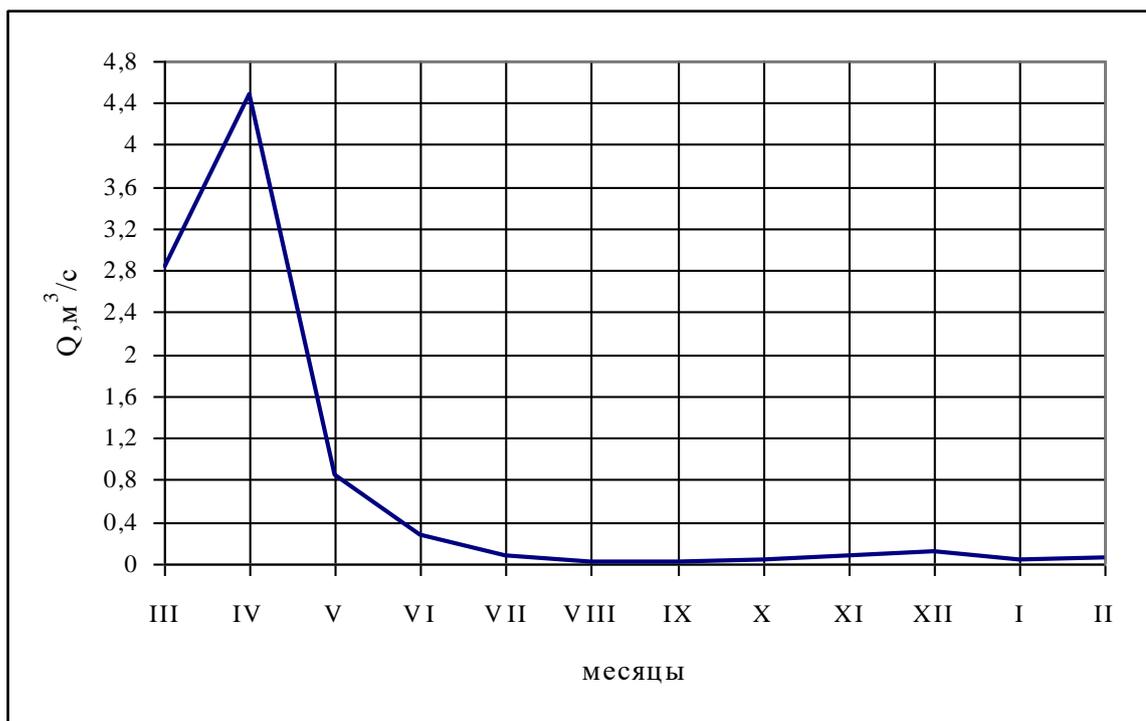
*Таблица 4.3 Внутригодовое распределение стока р.Нача – с.Горовицы за 1959-1960гг.*

Очень маловодный год (1959-1960)												
Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
в м <sup>3</sup> /с	3,17	5,03	0,94	0,32	0,08	0,02	0,02	0,04	0,09	0,12	0,05	0,06
в %	31,9	50,6	9,50	3,20	0,80	0,20	0,20	0,40	0,90	1,20	0,50	0,60

*Таблица 4.4 Внутригодовое распределение стока р.Нача – с.Горовицы за расчетный год.*

Очень маловодный год (90%)												
Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II
в %	31,9	50,6	9,50	3,20	0,80	0,20	0,20	0,40	0,90	1,20	0,50	0,60
в м <sup>3</sup> /с	2,83	4,49	0,84	0,28	0,07	0,02	0,02	0,04	0,08	0,11	0,04	0,05
млн.м <sup>3</sup> /мес	7,34	11,64	2,18	0,73	0,18	0,05	0,05	0,10	0,21	0,29	0,10	0,13

По данным таблицы 4.4 строится гидрограф стока для года 90%-ной обеспеченности (рисунок 4.2).



*Рисунок 4.2 Гидрограф стока р. Нача - с. Горовцы для года 90% обеспеченности.*

Результаты гидрологических расчетов — внутригодовое распределение стока используются для водохозяйственных расчетов.

[Вернуться в оглавление](#)

## Практическая работа №5

**Тема:** Построение объемной и топографических (батиграфических) характеристик водохранилища.

**Цель работы:** Построить батиграфические характеристики водохранилища.

### Краткие сведения из теории

Характеристиками водохранилища (или чаши водохранилища) принято называть графическое выражение зависимости объема, площади водной поверхности, средней глубины от отметок уровня воды в нем, т.е. зависимости вида

$$V = f(H), F = f_1(H), h_{cp} = f_2(H), \quad (5.1)$$

где  $V$  - объем воды при уровне  $H$ , м<sup>3</sup>;  $h_{cp}$  - средняя глубина водохранилища при уровне  $H$ , м;  $F$  - площадь водного зеркала при уровне  $H$ , м<sup>2</sup>.

### Ход выполнения работы

Нахождение топографических характеристик водохранилища ведем следующим образом. Имеется план местности района проектируемого водохранилища - выбирается согласно заданию (номер топоплана по приложениям). Сечение горизонталей задается преподавателем.

После выбора места и проектирования оси плотины (самое узкое место, перпендикулярно к горизонталям) производится измерение площади водного зеркала, соответствующего различным горизонталям плана. Измерения проводятся с помощью палетки или планиметра. Для этого разбивается вся площадь на квадраты и подсчитывается количество квадратов внутри каждой замкнутой горизонтали. Считаются как полные, так и неполные квадраты. Зная площадь одного единичного квадрата в масштабе, находится площадь внутри каждой горизонтали. Эти площади заносятся в графу 2 таблицы 5.1 ( $F_i$ ).

Первый от начальной плоскости элементарный объем определяется по формуле усеченного параболоида

$$\Delta V_{1,2} = \frac{2}{3} \cdot (F_1 + F_2) \cdot \Delta H_{1,2}. \quad (5.2)$$

Последующие объемы для любого значения  $H$  находятся по формуле и заносятся в графу 5 таблицы 5.1

$$\Delta V_{i,i+1} = 0,5 \cdot (F_i + F_{i+1}) \cdot \Delta H_{i,i+1}, \quad (5.3)$$

где  $\Delta V_{i,i+1}$  — частный объем водохранилища между горизонталями, м<sup>3</sup>;  $F_i, F_{i+1}$  — площади зеркала водохранилища соответственно на отметках  $H_i, H_{i+1}$ , м<sup>2</sup>;  $\Delta H_{i,i+1}$  — разница отметок горизонталей, м.

Средняя глубина водохранилища при различных значениях  $H$  (графа 7) вычисляется путем деления объема воды на площадь зеркала при одной и той же отметке наполнения.

Далее все вычисления сводим в таблицу 5.1. По результатам таблицы строятся графики зависимости  $V = f(H)$ ,  $F = f(H)$ ,  $h_{cp} = f(H)$  – рисунок 5.2.

После определения мертвого объема (пр. работа №7) на график (рис.5.2) наносится отметка уровня мертвого объема (УМО).

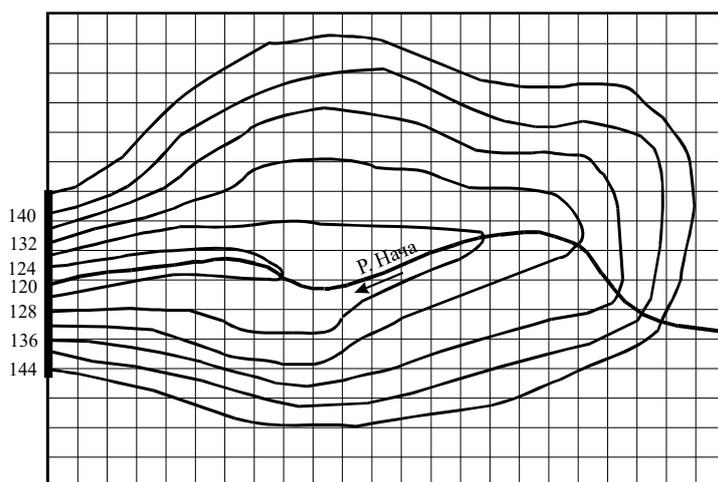


Рисунок 5.1 Топографические условия района строительства водохранилища М1:20 000 (сечение горизонталей 4 м).

Таблица 5.1 Определение данных к построению характеристик водохранилища.

$H_i, \text{ м}$	$\Delta H_i, \text{ м}$	$F_i, \text{ млн.м}^2$	$F_{cp}, \text{ млн.м}^2$	$\Delta V_i, \text{ млн.м}^3$	$V_i, \text{ млн.м}^3$	$h_{cp}, \text{ м}$
1	2	3	4	5	6	7
120		0,00			0,00	0,00
	4		0,05	0,20		
124		0,07			0,20	2,86
	4		0,31	1,24		
....	...	...	...	...	...	...
140		2,00			17,08	8,54
	4		2,32	9,28		
144		2,63			26,36	10,02

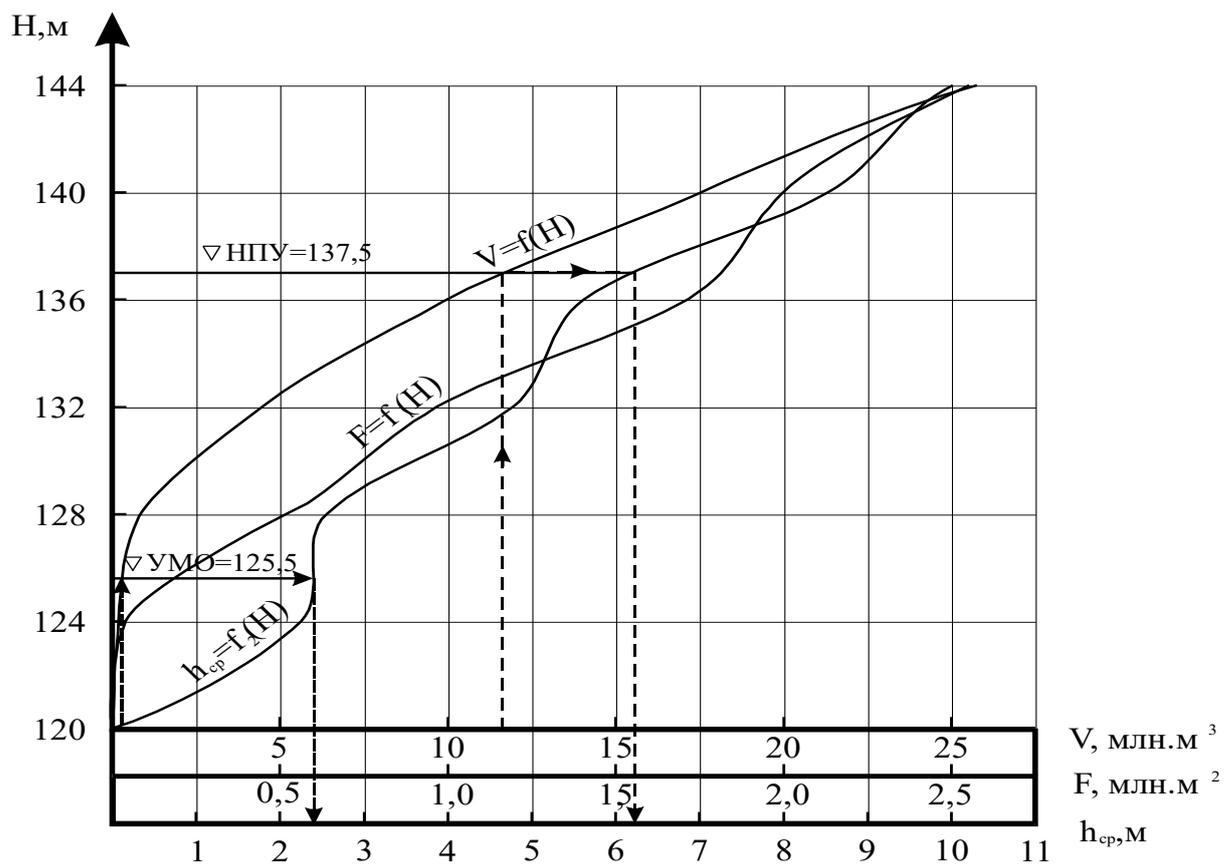


Рисунок 5.2 Характеристики водохранилища.

[Вернуться в оглавление](#)

## Практическая работа №6

**Тема:** Определение мертвого объема водохранилища.

**Цель работы:** Определить мертвый объем водохранилища и отметку УМО.

### Краткие сведения из теории

Мертвый объем водохранилища – объем, заключенный между дном и зеркалом воды на отметке уровня мертвого объема (УМО). Мертвый объем должен удовлетворять ряду требований:

- обеспечивать аккумуляцию наносов, задерживаемых водохранилищем на протяжении всего периода предстоящей работы;
- обеспечивать судоходные глубины на вышерасположенном участке;
- должны соблюдаться санитарные условия, сводящиеся к недопущению образования мелководий во избежание очагов малярии, сильного перегрева воды, сильного зарастания, для чего средняя глубина при УМО не должна быть менее 1,5...2,0 м.

В работе мертвый объем должен обеспечивать аккумуляцию наносов и отвечать санитарно-техническим условиям. В соответствии с этим определяем объем заиления водохранилища за период его работы, а затем полученную величину заиления проверяем – отвечает ли она санитарно-техническим условиям.

### Ход выполнения работы

Зная норму стока, объем наносов определяется по формуле

$$V_{н.год.} = 31,5 \cdot \bar{\rho} \cdot \bar{Q} \cdot \gamma^{-1} = 31,5 \cdot 55 \cdot 1,19 \cdot 1 = 2062 \text{ м}^3, \quad (6.1)$$

где  $\bar{Q} = 1,19 \text{ м}^3 / \text{с}$  – норма годового стока для реки Нача - с.Горовцы (выдает преподаватель);  $\bar{\rho}$  – норма годовой мутности,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $\gamma$  – объемный вес наносов, в работе принимается равным  $1,0 \text{ т}/\text{м}^3$ .

Зная величину заиления за год  $V_{н.год.}$  и период (срок) работы водохранилища  $T$ , определяется объем заиления водохранилища за период его эксплуатации

$$V' = V_{н.год.} \cdot T = 2061,68 \cdot 105 \approx 216476 \text{ м}^3 \approx 0,216 \text{ млн. м}^3. \quad (6.2)$$

В заилении водохранилища принимают участие наносы, образующиеся при переработке берегов после наполнения водохранилища. Величина заиления от переработки берегов принимается равной 5% от объема заиления, т.е. в численном выражении

$$V_{н.б.} = 0,05 \cdot V' = 0,05 \cdot 0,216 = 0,01 \text{ млн. м}^3 \quad (6.3)$$

Тогда полный объем заиления составит

$$V = V' + V_{н.б.} = 0,216 + 0,01 \approx 0,23 \text{ млн. м}^3 \quad (6.4)$$

Далее по топографическим кривым (рисунок 5.2) определяется средняя глубина, которая составит  $h_{cp} = 2,3 \text{ м}$ . Так как данная глубина больше минимально допустимой, то принимается полный объем заиления за мертвый, т.е.  $V = V_{MO} = 0,23 \text{ млн. м}^3$ .

**Примечание:** если полученная глубина  $h_{cp} < 1,5 \dots 2,0 \text{ м}$ , используя график средних глубин и объемов (рисунок 5.2) получить величину мертвого объема.

Далее на рисунок 5.2, используя величину мертвого объема, наносится отметка УМО и проводится до пересечения с графиком  $h_{cp} = f_2(H)$ , на этой линии и указывается конкретное значение отметки УМО. В нашем случае отметка УМО=125,5м.

[Вернуться в оглавление](#)

## Практическая работа №7

**Тема:** Расчет потерь воды из водохранилища на испарение и фильтрацию.

**Цель работы:** Рассчитать потери воды из водохранилища на испарение и фильтрацию.

### Краткие сведения из теории

При создании водохранилища, вследствие затопления и подтопления части территории, подпора и повышения уровня грунтовых вод, происходит изменение соотношения между элементами водного баланса. В результате этих изменений, возникают дополнительные потери воды, основными из которых являются потери на испарение и фильтрацию. Кроме того, к потерям временного характера относят объемы воды, необходимые для заполнения мертвого объема и пополнения запасов подземных вод в начальный период эксплуатации водохранилища, а также временные потери воды из-за оседания льда и покрывающего его снега на берегах водохранилища в период его зимней сработки.

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

### Ход выполнения работы

#### *Потери на испарение*

Суммарная за год величина слоя дополнительного испарения определяется по формуле

$$Z_{дон} = Z_e - X \cdot (1 - \alpha_c) = 580 - 600 \cdot (1 - 0,35) = 190 \text{ мм}, \quad (7.1)$$

где  $Z_e$  и  $X$  – испарение с водной поверхности и норма осадков для района проектирования, соответственно (таблица 7.1), мм;  $\alpha_c$  – коэффициент стока (в работе принимается равным 0,35).

*Таблица 7.1 Значения средних значений за год испарения с водной поверхности ( $Z_e$ ) и осадков ( $X$ ).*

Область проектирования	$Z_e$ , мм	$X$ , мм
Витебская	560	650
Минская	570	650
Гродненская	570	700
Брестская	600	550
Гомельская	620	600
Могилевская	580	600

Внутригодовое распределение испарения по месяцам устанавливаем, имея процентное распределение по месяцам (таблица 7.2), которое в работе принимается одинаковым для всех районов.

*Таблица 7.2 Значения испарения по месяцам года.*

Месяцы	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Сумма
Z <sub>доп</sub> , %	-8	4	10	18	26	24	16	8	2	100
Z <sub>доп</sub> , мм	-15,2	7,6	19	34,2	49,4	45,6	30,4	15,2	3,8	190

Процент со знаком минус в марте указывает на то, что расчетное испарение в марте перекрывается величиной растаявшего льда. Расчетное испарение за XII, I и II месяцы принимается равным нулю.

#### *Потери на фильтрацию*

Для приближенной оценки величины потерь на фильтрацию в зависимости от гидрологических условий применяют следующие нормы (в процентах от наличного объема воды в водохранилище):

- 1) при хороших гидрологических условиях — величина потерь от 5 до 10% в год или 0,5...1,0% в месяц;
- 2) при средних гидрологических условиях — 10...20% в год или 1,0...1,5% в месяц;
- 3) при плохих гидрологических условиях — 20...40% в год или 1,5...2,0% в месяц;

В нашем примере при хороших гидрологических условиях принимаются потери на фильтрацию – 12% в год или 1% в месяц от наличного объема воды в водохранилище.\

[Вернуться в оглавление](#)

## Практическая работа №8

**Тема:** Определение емкости водохранилища сезонно-годового регулирования стока.

- Цель работы:** 1) Рассчитать полезный объем водохранилища сезонно-годового регулирования с учетом потерь по второму способу с регулированием по второму варианту.  
2) Определить отметку НПУ.

### Краткие сведения из теории

Полезный объем водохранилища определяется путем сопоставления графика притока и потребления табличным способом с учетом потерь при регулировании по первому варианту, т.е. расчет ведем с момента опорожнения и ведем "ходом назад" (против часовой стрелки), вычитая избытки и прибавляя недостатки и потери, до получения к началу какого-то месяца наибольшей величины объема (после чего объем начнет уменьшаться). Эта наибольшая величина объема и будет равна полезному объему плюс мертвый – полный объем водохранилища. Далее возвращаемся к моменту опорожнения и ведем расчет "ходом вперед", вычитая недостатки и потери и прибавляя избытки до момента, пока расчет не замкнется. Если величина окончательного объема превысит величину полного объема водохранилища, то в графу окончательного объема записываем полный объем, а полученная разница записывается в графу сброса.

### Ход выполнения работы

Весь расчет сводим в таблицу 8.1.

Приток воды к водохранилищу принимается по таблице 4.4 строка 5 (практическая работа №4).

Объем потребления определяется путем анализа потребителей. В учебных целях объем воды на потребительские нужды определяется следующим образом. Рассчитанная сумма притока за год ( $23,00 \text{ млн.м}^3$ ), умножается на  $0,75$  и распределяется равномерно по месяцам  $23,00 \cdot 0,75 = 17,25 / 12 = 1,44 \text{ млн.м}^3$ . Заносятся эти одинаковые значения в графу 3 (*потребление  $\Sigma q$* ). Далее находится разница между притоком и потреблением и записывается в графы 4 и 5 (в зависимости от знака).

Дальнейший расчет ведется *построчно*. Записывается мертвый объем ( $0,23$ ) в графы 6 и 13 на начало многоводной фазы. Если выделяется две или более фаз, где имеющиеся водные ресурсы превышают потребление, то за расчетный принимается наиболее многоводная фаза. В нашем случае, мертвый объем приходится на начало марта и конец февраля и к значению в графе 13 (нижнему) прибавляется недостаток за II месяц (графа 5) и

записывается на начало II месяца (графа 6):  $0,23+1,31=1,54$ . Находится среднее между значениями в графах 13 и 6 и записывается в графу 7 напротив II месяца:  $(0,23+1,54)/2=0,89$ . Далее по графику 3 находится площадь зеркала  $F$  и записывается в графу 8. В графу 9 переписываются значения дополнительного испарения из таблицы 7.2. Определяются потери на испарение по формуле  $W_z = (Z_{дон.} \cdot F)/1000 = (0 \cdot 0,38)/1000 = 0,00$ . Потери на фильтрацию принимаются в размере 1% от величины расчетного объема (хорошие гидрологические условия) и заносятся в графу 11:  $0,89 \cdot 1/100 = 0,01$ . В графе 12 записываются суммарные потери:  $0,00+0,01=0,01$ . Далее к предварительному объему в графе 6 прибавляются суммарные потери в графе 12 и записываются в графу 13:  $1,54+0,01=1,55$ . И так далее до получения максимального значения величины  $V_{ок}$ .

Если продолжать расчет дальше, то получаемые объемы будут уменьшаться. Поэтому, полученная наибольшая величина объема и представляет собой искомый полезный объем водохранилища плюс мертвый объем.

Поэтому заканчивается расчет «ходом назад». Возвращаемся к исходному пункту (моменту опорожнения) и продолжается расчет «ходом вперед», т.е. вычитаются недостатки и потери и прибавляются избытки. В нашем случае:  $0,23+5,90=6,13$ ;  $(6,13+0,23)/2=3,18$ ;  $6,13-0,02=6,11$ . Если в графах 6 или 13 получается значение большее, чем  $12,03$ , то записывается все равно  $12,03$ .

Далее рассчитываются сбросы по формуле

$$R = V_{ок} + (W - \sum q) - V_{max\ раб.} - W_n. \quad (8.1)$$

$$R_1 = 6,11 + 10,20 - 12,03 - 0,10 = 4,18 \text{ млн.м}^3;$$

$$R_2 = 12,03 + 0,74 - 12,03 - 0,14 = 0,60 \text{ млн.м}^3.$$

По результатам расчета проводится проверка

$$\sum W = \sum q + \sum W_n + \sum R \quad (8.2)$$

$$23,00 = 17,28 + 0,94 + 4,78$$

$$23,00 = 23,00$$

и рассчитывается полезный объем водохранилища

$$V_{пз} = V_{плн} - V_{мо} = 12,03 - 0,23 = 11,80 \text{ м}^3. \quad (8.3)$$

Далее по рисунку 5.2, используя величину полного объема, определяется отметка НПУ=137,5м.

[Вернуться в оглавление](#)

Таблица 8.1 Расчет водохранилища сезонно-годового регулирования стока с учетом потерь по второму способу (регулирование по первому варианту)

Месяцы	Объем, млн.м <sup>3</sup>		Разность		Предварительный объем V <sub>пред.</sub> , млн.м <sup>3</sup>	Расчетный объем V <sub>расч.</sub> , млн. м <sup>3</sup>	Площадь зеркала F, млн.м <sup>2</sup>	Доп. испарение Z <sub>доп.</sub> , мм	Объем потерь, млн.м <sup>3</sup>			Окончат. объем V <sub>ок.</sub> , млн.м <sup>3</sup>	Сброс R, млн.м <sup>3</sup>
	Приток W	Потребление, Σq	Избытки +	Недостатки -					на испарение W <sub>з</sub>	на фильтрацию W <sub>ф</sub>	всего W <sub>п</sub>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
					0,23							0,23	
III	7,34	1,44	5,90		6,13	3,18	0,68	-9	-0,01	0,03	0,02		
IV	11,64	1,44	10,20		12,03	9,07	1,26	4	0,01	0,09	0,10		4,18
V	2,18	1,44	0,74		11,88	12,03	1,58	11	0,02	0,12	0,14		0,60
VI	0,73	1,44		0,71	11,03	11,53	1,51	19	0,03	0,12	0,15		
VII	0,18	1,44		1,26	9,65	10,40	1,37	28	0,04	0,10	0,14		
VIII	0,05	1,44		1,39	8,17	8,96	1,17	26	0,03	0,09	0,12		
IX	0,05	1,44		1,39	6,71	7,48	0,97	17	0,02	0,07	0,09		
X	0,10	1,44		1,34	5,32	6,04	0,84	9	0,01	0,06	0,07		
XI	0,21	1,44		1,23	4,06	4,71	0,77	2	0,00	0,05	0,05		
XII	0,29	1,44		1,15	2,89	3,49	0,72	0	0,00	0,03	0,03		
I	0,10	1,44		1,34	1,54	2,22	0,63	0	0,00	0,02	0,02		
II	0,13	1,44		1,31	0,23	0,89	0,38	0	0,00	0,01	0,01		
												0,23	
Σ	23,00	17,28									0,94		4,78

## Практическая работа №9

**Тема:** Построение расчетного гидрографа весеннего половодья.

**Цель работы:** 1) Определить ординаты расчетного гидрографа стока воды;  
2) Построить гидрограф весеннего половодья при отсутствии данных наблюдений.

### Краткие сведения из теории

Гидрографы весеннего половодья необходимо рассчитывать при проектировании водохранилищ, прудов, оценке затопления пойм, пропуске высоких вод через дорожные и другие искусственные сооружения. Форма расчетных гидрографов принимается по моделям наблюдавшихся высоких половодий и дождевых паводков с наиболее неблагоприятной их формой, для которых основные элементы гидрографов и их соотношение должны быть близки к расчетным. При наличии данных гидрометрических наблюдений параметры расчетного гидрографа весеннего половодья определяются по моделям наблюдаемых гидрографов. При отсутствии данных – используются геометрические формулы или уравнения. Расчетные гидрографы стока воды рек определяются для весеннего половодья – по средним суточным расходам воды.

Максимальный средний суточный расход определяется по формуле

$$Q_p = \frac{Q_p'}{k_t} \quad (9.1)$$

где  $Q_p'$  - максимальный мгновенный расход воды весеннего половодья принимаемый  $Q_p' = Q_{\max p}$ ,  $Q_{\max p}$  - исправленный расход воды (см. практическую работу);  $k_t$  - коэффициент перехода от максимального мгновенного расхода воды весеннего половодья ( $Q_p'$ ) к среднему суточному расходу ( $Q_p$ ) определяемый по таблице 9.1

Таблица 9.1 Переходный коэффициент ( $k_t$ )

Бассейны рек	Коэффициент ( $k_t$ ) при площадях водосбора, км <sup>2</sup> , равных								
	0,1	0,5	1	5	10	50	100	500	1500
Реки бассейна Западной Двины	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,2	1,15	1,0	1,0
Реки других бассейнов	3,5	2,8	2,6	2,1	1,9	1,6	1,4	1,15	1,0

Для водосборов площадью более 1500 км<sup>2</sup> ( $k_t$ ) принимается равным 1,0. Одновершинные гидрографы следует рассчитывать по формуле

$$y = 10 \frac{a(1-x)^2}{x}, \quad (9.2)$$

где  $y$  – ординаты расчетного гидрографа ( $Q_i$ ), выраженные в долях максимального мгновенного расхода воды ( $Q_p'$ ) – для паводков и максимального среднего суточного расхода воды ( $Q_p$ ) – для половодий;  $x$  – абсцисса расчетного гидрографа, выраженная в долях условной продолжительности подъема паводка ( $t_n$ );  $\lambda$  – параметр, зависящий от коэффициента формы гидрографа ( $\lambda$ ).

Коэффициент формы гидрографа ( $\lambda$ ), абсцисса ( $x$ ) и ордината ( $y$ ) определяются согласно таблице 9.2, в зависимости от коэффициента несимметричности, вычисляемого по данным рек-аналогов ( $k_{s,a}$ ), по формуле

$$k_{s,a} = \frac{h_{n,a}}{h_a}, \quad (9.3)$$

где  $h_{n,a}$  – слой стока за период подъема половодья на реке-аналоге, мм;  $h_a$  – суммарный слой стока половодья на реке-аналоге, мм.

Ординаты расчетного гидрографа следует определять по формуле

$$Q_i = y \cdot Q_p, \quad (9.4)$$

абсциссы - по формуле

$$t_i = x \cdot t_n, \quad (9.5)$$

где  $x$ ,  $y$  – относительные ординаты расчетного гидрографа стока воды, принимаются по таблице 9.3;  $Q_p$  – расчетный максимальный средний суточный расход воды весеннего половодья или мгновенный расход воды дождевого паводка,  $m^3/c$ , определяемый по формуле 9.1;  $t_n$  – продолжительность подъема весеннего половодья, сут, которая определяется по формуле

$$t_n = \frac{0,0116 \cdot \lambda \cdot h_p}{q_p}, \quad (9.6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент учитывающий форму гидрографа, для Беларуси  $\lambda=0,6$ ;  $q_p$  – расчетный модуль максимального среднего суточного расхода воды весеннего половодья,  $m^3/c \cdot km^2$ , определяемый по формуле

$$q_p = \frac{Q_p}{A}, \quad (9.7)$$

где  $A$  – площадь водосбора,  $km^2$ ;  $h_p$  – слой стока расчетной обеспеченности, мм, рассчитывается по формуле

$$h_p = K_p \cdot h_0, \quad (9.8)$$

где  $h_0$  – средний многолетний слой стока весеннего половодья (мм), определяемый по картам изолиний приложения У [2];  $K_p$  – модульный коэффициент расчетной обеспеченности, (см. практическую работу №3).

## Ход выполнения работы

Рассмотрим ход выполнения работы на конкретном примере.

Требуется построить расчетный гидрограф стока воды на р.Нача – с.Горовцы. Максимальный мгновенный расход воды весеннего половодья  $Q_p' = 9,37 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. практическую работу). Заданная вероятность превышения (обеспеченность) расхода воды  $P=5\%$ . Площадь водосбора –  $212 \text{ км}^2$ .

Расчет производится в следующем порядке:

1) максимальный средний суточный расход ( $Q_p$ ) определяется по формуле 9.1, при  $k_t=1,412$ , взятый по таблице 9.1

$$Q_p = \frac{9,37}{1,11} = 8,44 \text{ м}^3 / \text{с};$$

2) расчетный модуль максимального среднего суточного расхода воды весеннего половодья ( $q_p$ ), вычисляется по формуле 9.7

$$q_p = \frac{8,44}{212} = 0,4 \text{ м}^3 / \text{с} \cdot \text{км}^2$$

3) по картам изолиний (приложения У, Ф) определяются значения среднего многолетнего слоя тока весеннего половодья и коэффициент вариации:  $h_0=95 \text{ мм}$ ,  $C_v=0,42$ ; соотношение ( $C_s/C_v$ ) принимается равным 2,0 как для реки бассейна Западной Двины;

4) значение ординаты обеспеченности 5% определяется по таблице кривых трехпараметрического гамма-распределения Ж.1 ( $k_{5\%}=1,78$ );

5) по формуле 9.8 определяется слой стока расчетной обеспеченности ( $h_p$ )

$$h_p = 1,78 \cdot 95 = 169 \text{ мм};$$

6) по формуле 9.6 определяется продолжительность подъема весеннего половодья ( $t_n$ )

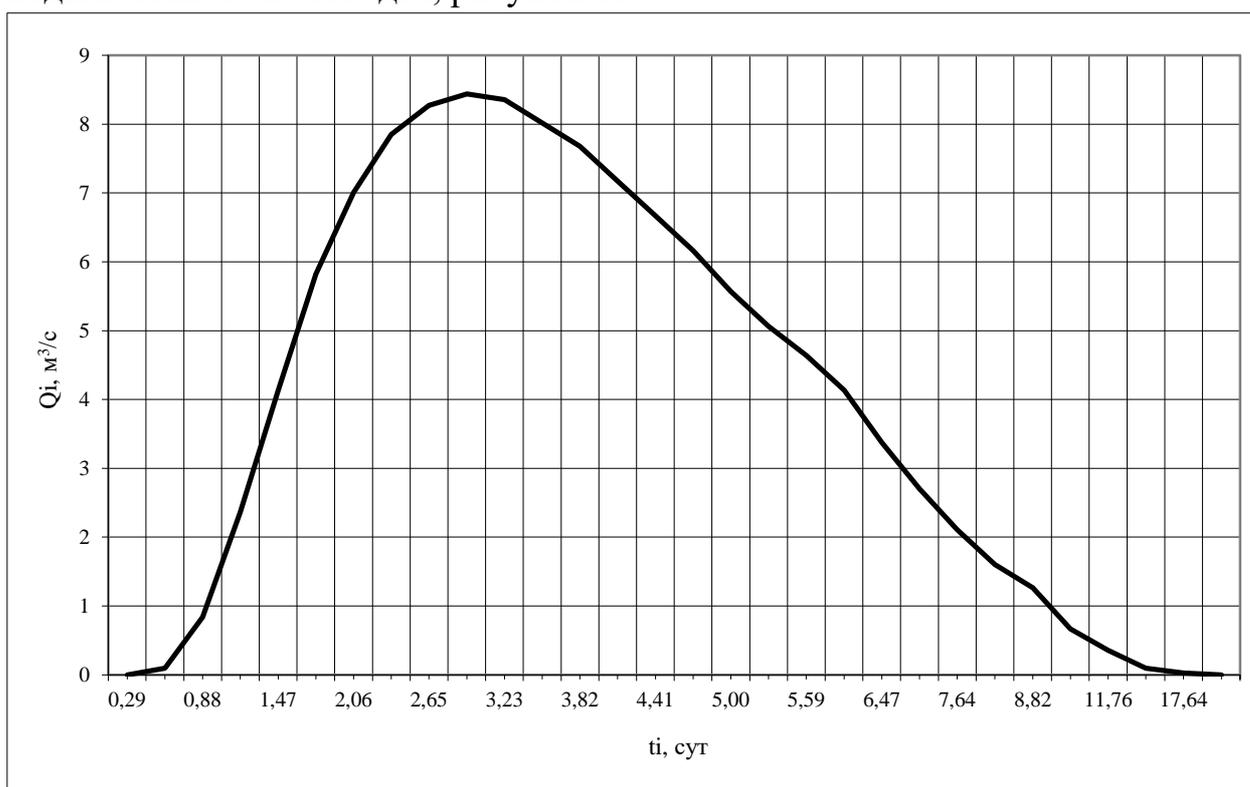
$$t_n = \frac{0,0116 \cdot 0,6 \cdot 169}{0,4} = 2,94 \text{ сут};$$

7) по формулам 9.4 и 9.5 вычисляем ординаты расчетного гидрографа стока воды, для более удобного расчета составляется таблица 9.3

*Таблица 9.3 Координаты расчетного гидрографа стока воды весеннего половодья*

x	y	$t_i$ , сут	$Q_i$ , $\text{м}^3/\text{с}$
1	2	3	4
0,1	0	0,294	0
0,2	0,011	0,588	0,093
0,3	0,099	0,882	0,836
...	...	...	...
6,0	0,003	17,64	0,025
8,0	0	23,52	0

8) по графам 3 и 4 таблицы 12.3 строится расчетный гидрограф стока воды весеннего половодья, рисунок 12.1.



*Рисунок 9.1 Расчетный гидрограф стока воды весеннего половодья.*

[Вернуться в оглавление](#)

Таблица 9.2 Относительные ординаты расчетного гидрографа стока воды  $y = \bar{Q}_i / \bar{Q}_P$ , для  $x = t_i / t_N$ , при различных значениях коэффициентов ( $\lambda$ ) и ( $k_c$ )

$x = t_i / t_N$	Значения $y = \bar{Q}_i / \bar{Q}_P$ при различных $\lambda = q \cdot t_{\text{п}} / (0.0116 \cdot h_P)$ , равных																				
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.2	2.4	2.6
0.1	0,023	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0,21	0,091	0,034	0,011	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.3	0,45	0,29	0,18	0,099	0,050	0,022	0,009	0,003	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.4	0,66	0,51	0,39	0,28	0,19	0,12	0,076	0,043	0,024	0,013	0,006	0,003	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0,78	0,69	0,59	0,49	0,40	0,31	0,24	0,18	0,13	0,088	0,059	0,039	0,025	0,015	0,009	0,005	0,003	0,002	0	0	0
0.6	0,88	0,82	0,75	0,69	0,61	0,54	0,47	0,39	0,33	0,27	0,22	0,18	0,14	0,12	0,088	0,066	0,049	0,036	0,017	0,009	0,004
0.7	0,94	0,91	0,87	0,83	0,79	0,74	0,69	0,64	0,59	0,54	0,48	0,43	0,39	0,34	0,30	0,26	0,22	0,19	0,14	0,094	0,062
0.8	0,97	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87	0,84	0,81	0,78	0,75	0,72	0,69	0,66	0,62	0,59	0,55	0,52	0,46	0,40	0,34
0.9	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,84	0,82	0,79
1.0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1.1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,84	0,82	0,79
1.2	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89	0,87	0,85	0,83	0,80	0,78	0,76	0,73	0,70	0,68	0,65	0,60	0,54	0,49
1.3	0,97	0,95	0,93	0,91	0,88	0,85	0,82	0,78	0,75	0,71	0,68	0,64	0,60	0,56	0,52	0,48	0,44	0,41	0,34	0,28	0,22
1.4	0,95	0,92	0,89	0,85	0,81	0,77	0,72	0,67	0,62	0,57	0,52	0,48	0,43	0,38	0,34	0,30	0,26	0,23	0,17	0,12	0,084
1.5	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,68	0,62	0,56	0,50	0,44	0,39	0,34	0,29	0,25	0,21	0,17	0,14	0,12	0,075	0,046	0,027
1.6	0,90	0,85	0,79	0,73	0,66	0,59	0,52	0,46	0,39	0,34	0,28	0,23	0,19	0,15	0,12	0,092	0,071	0,054	0,030	0,016	0,008
1.7	0,87	0,81	0,74	0,66	0,59	0,51	0,44	0,37	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12	0,089	0,066	0,047	0,034	0,024	0,011	0,005	0,002
1.8	0,84	0,77	0,69	0,60	0,52	0,44	0,36	0,29	0,23	0,18	0,13	0,10	0,072	0,050	0,035	0,023	0,015	0,010	0,004	0,001	0
1.9	0,81	0,73	0,64	0,55	0,46	0,37	0,29	0,23	0,17	0,13	0,089	0,063	0,043	0,028	0,018	0,011	0,007	0,004	0,001	0	0
2.0	0,78	0,69	0,59	0,49	0,40	0,31	0,24	0,18	0,13	0,088	0,059	0,039	0,025	0,015	0,008	0,005	0,003	0,002	0	0	0
2.2	0,73	0,61	0,50	0,40	0,30	0,22	0,15	0,10	0,066	0,042	0,025	0,014	0,008	0,005	0,002	0,001	0,001	0,001	0	0	0
2.4	0,67	0,54	0,42	0,32	0,22	0,15	0,096	0,058	0,034	0,019	0,010	0,005	0,002	0,001	0	0	0	0	0	0	0
2.6	0,62	0,48	0,35	0,25	0,16	0,10	0,060	0,032	0,017	0,008	0,004	0,002	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
2.8	0,57	0,42	0,29	0,19	0,12	0,068	0,036	0,018	0,008	0,004	0,001	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0	0,53	0,37	0,24	0,15	0,086	0,045	0,022	0,010	0,004	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0,43	0,26	0,15	0,079	0,037	0,016	0,006	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	0,34	0,19	0,092	0,042	0,016	0,005	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.0	0,21	0,091	0,034	0,011	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.0	0,13	0,044	0,012	0,003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.0	0,052	0,010	0,002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$k_{\text{в}} =$ $=h_{\text{в}}/h_{\text{с}} =$ $=f(\lambda)$	0,19	0,23	0,26	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44

## Практическая работа №10

**Тема:** Расчет трансформации паводкового стока водохранилищем.

**Цель работы:** 1) Рассчитать и построить кривую сбросных расходов.

2) Определить максимальный сбросной расход.

3) Определить отметку форсированного подпорного уровня.

### Краткие сведения из теории

Все методы расчета трансформации паводкового стока основаны на интегрировании уравнения водного баланса водохранилища. Для этого необходимо иметь расчетный гидрограф притока и заданный тип сбросных сооружений.

Расчетный гидрограф принимается по результатам выполненных расчетов в практической работе №9.

В качестве сбросного сооружения принимается водослив с отметкой порога на НПУ.

Расход воды через водослив практического профиля определяется по формуле

$$q = m\sqrt{2g} \cdot h^{1.5} \cdot B, \quad (10.1)$$

где  $B$  – ширина водосливного фронта, м;  $h$  – напор над гребнем водослива;  $m$  – коэффициент расхода водослива.

Расчет производится графоаналитическим методом.

Метод заключается в решении уравнения водного баланса водохранилища и конечных разностях, преобразованного к виду

$$V_2 + 0,5 \cdot q_2 \cdot \Delta t = \bar{Q} \cdot \Delta t + (V_1 + 0,5 \cdot q_1 \cdot \Delta t) - q_1 \cdot \Delta t \quad (10.2)$$

Для решения данного уравнения необходимо построение вспомогательного графика  $q = f(V + 0,5 \cdot q \cdot \Delta t)$ . При этом расчетный интервал времени  $\Delta t = 2 \text{ сут.} = 0,1728 \text{ млн.сек.}$  Для определения координат графика составляется таблица 10.1, а для построения кривой сбросных расходов – таблица 10.2.

Уточненное значение сляя форсировки рассчитывается по формуле

$$h_\phi = \left( \frac{q_{\max}}{m \cdot \sqrt{2g} \cdot B} \right)^{2/3} \quad (10.3)$$

где  $q_{\max}$  – максимальный сбросной расход, снятый с кривой сбросных расходов.

Форсированный подпорный уровень определяется по формуле

$$\Phi ПУ = НПУ + h_\phi \quad (10.4)$$

Объем форсировки (регулирующий объем водохранилища) определяется как разность объемов при ФПУ и НПУ

$$V_{\phi} = V_{\Phi ПУ} - V_{НПУ} \quad (10.5)$$

### Ход выполнения работы

Рассмотрим ход выполнения работы на конкретном примере.

Требуется рассчитать и построить кривую сбросных расходов, определить максимальный сбросной расход ( $q_{\max}$ ) и отметку форсированного подпорного уровня (ФПУ). Пусть НПУ=137,5 м,  $Q_{\max 5\%}=8,44 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $m=0,46$ .

1) Задаваясь предварительно слоем форсировки  $h_{\phi} = \Phi ПУ - НПУ = 1,5 \text{ м}$ , определяется ориентировочное значение ширины водосливного фронта

$$B = \frac{Q_{\max 5\%}}{m \sqrt{2g \cdot h^{1,5}}} = \frac{8,44}{0,46 \cdot 4,43 \cdot 1,5^{1,5}} = 2,25 \text{ м}$$

В связи с тем, что регулирующая емкость водохранилища уменьшает  $Q_{\max 5\%}$  расчетное значение  $B$  уменьшают на 10-15% (в примере  $B=2 \text{ м}$ ).

2) Сбросной расход определяется по формуле 10.1

$$q = 0,46 \cdot 4,43 \cdot 2 \cdot h^{1,5} = 4,08 \cdot h^{1,5}$$

3) Для определения координат графика составляется таблица 10.1

Таблица 10.1 Расчет координат вспомогательного графика

Н, м	$h_{\phi}$ , м	$q=4,08h^{1,5}$ м <sup>3</sup> /с	$V_{\Pi}$ , млн.м <sup>3</sup>	$V=V_{\Pi}-V_{НПУ}$ млн.м <sup>4</sup>	$0,5q\Delta t$ млн.м <sup>5</sup>	$V+0,5q\Delta t$ млн.м <sup>6</sup>
1	2	3	4	5	6	7
НПУ=137,5 м	0	0	12,03	0	0	0
138	0,5	1,44	14,50	2,47	0,06	2,53
138,5	1	4,08	15,00	2,97	0,18	3,15
139	1,5	7,50	16,10	4,07	0,32	4,39

4) По таблице 10.1 (графы 3 и 7) строится кривая  $q = f(V + 0,5q\Delta t)$

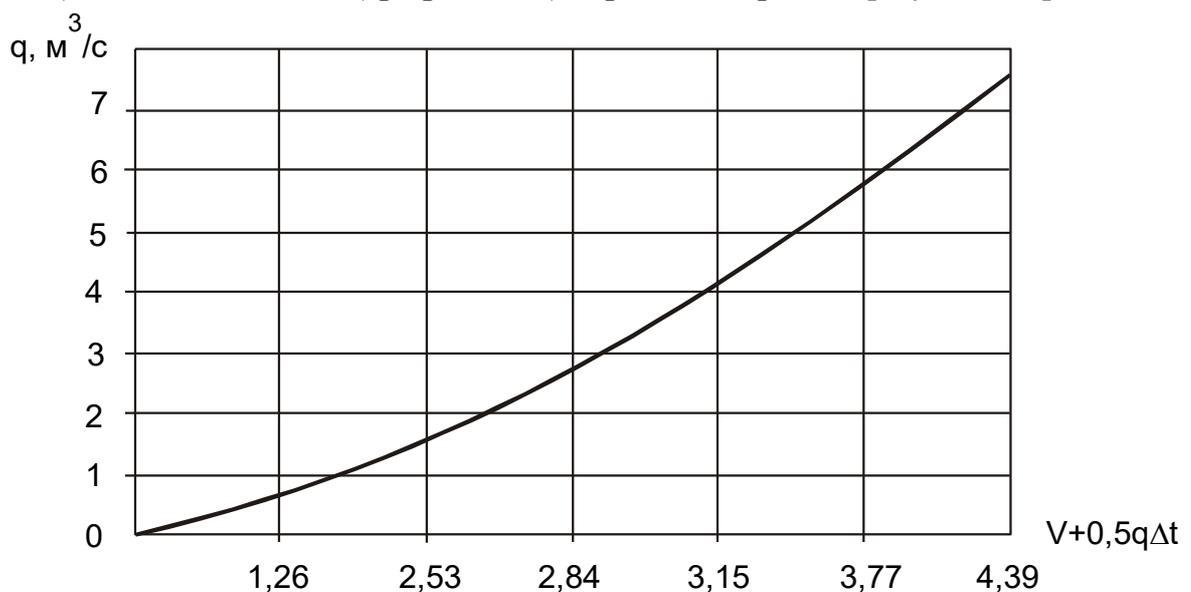


Рисунок 10.1 Кривая  $q = f(V + 0,5q\Delta t)$

5) Для построения кривой сбросных расходов составляется таблица 10.2.

В графе 2 таблицы 10.2 записываются расходы паводка на начало (конец) каждого расчетного интервала (суток), снятые с расчетного гидрографа весеннего половодья (см. практическую работу №9, рис.9.1); в графе 3 – средние за каждый интервал расходы паводка; в графе 4 определяется объем притока воды в водохранилище за каждый интервал. Далее определяется правая часть уравнения водного баланса (формула 10.2)

$$V_2 + 0,5 \cdot q_2 \cdot \Delta t = \bar{Q} \cdot \Delta t + (V_1 + 0,5 \cdot q_1 \cdot \Delta t) - q_1 \cdot \Delta t$$

$V_2 + 0,5 \cdot q_2 \cdot \Delta t = 0,13 + 0 - 0 = 0,13$ , по полученной величине с вспомогательного графика (рисунок 10.1) снимается значение  $q_2$  на конец первого интервала (графа 5). Затем определяется графа 6, путем умножения сбросного расхода  $q$  (графа 5) на расчетный интервал времени  $\Delta t$ . Далее расчет вновь ведется по уравнению водного баланса на начала второго интервала  $V_2 + 0,5 \cdot q_2 \cdot \Delta t = 0,46 + 0,13 - 0,01 = 0,59$ . По величине (0,59 млн.м<sup>3</sup>) и графику 10.1 определяется  $q_2 = 0,33$  м<sup>3</sup>/с на конец второго (или начало третьего) интервала времени и т.д.

Таблица 10.2 Расчет сбросных расходов

Интервалы	Q, м <sup>3</sup> /с	$\bar{Q}$ , м <sup>3</sup> /с	$\bar{Q}\Delta t$ , млн. м <sup>3</sup>	q, м <sup>3</sup> /с	qΔt, млн. м <sup>3</sup>	V + 0,5qΔt млн. м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7
	0			0	0	0
1	3,08	1,54	0,13	0,07	0,01	0,13
	7,68	5,38	0,46	0,33	0,03	0,59
2	8,29	7,98	0,69	0,69	0,06	1,25
	6,87	7,58	0,65	1,12	0,10	1,85
	5,06	5,96	0,52	1,42	0,12	2,27
5		4,33	0,37			
6	3,60	3,03	0,26	1,59	0,14	2,52
	2,46	2,02	0,17	2,03	0,18	2,64
7	1,57	1,32	0,11	2,03	0,18	2,64
	1,07	0,87	0,08	1,79	0,16	2,58
10	0,67	0,56	0,05	1,58	0,14	2,50
	0,45	0,38	0,03	1,52	0,13	2,41
12	0,31					

6) По данным графы 5 таблицы 10.2 строится кривая расходов (рисунок 10.2).

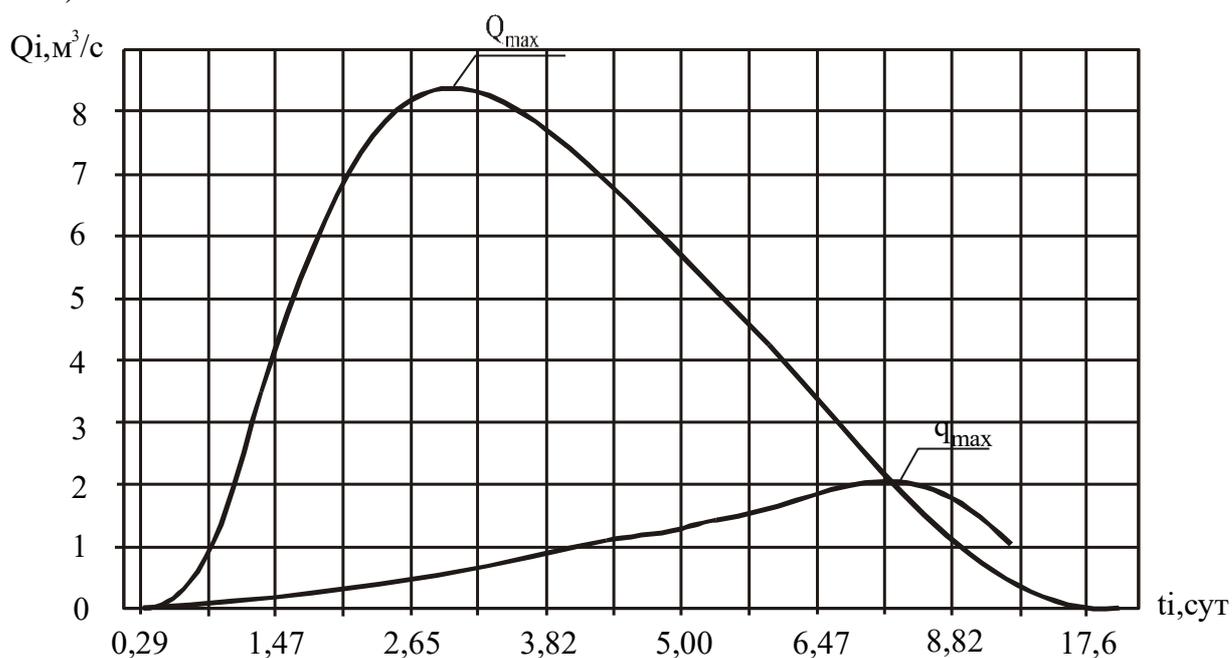


Рисунок 10.2 Расчетный гидрограф притока и кривая сбросных расходов.

7) Рассчитывается уточненное значение слоя форсировки по формуле 10.3

$$h_{\phi} = \left( \frac{2,03}{0,46 \cdot 4,43 \cdot 2} \right)^{2/3} = 0,63 \text{ м.}$$

8) Форсированный подпорный уровень определяется по формуле 13.4

$$\Phi ПУ = 137,5 + 0,63 = 138,13 \text{ м.}$$

9) Объем форсировки вычисляется по формуле 13.5

$$V_{\phi} = 14 - 12,03 = 1,97 \text{ млн. м}^3$$

[Вернуться в оглавление](#)

## **Материалы для проведения лабораторных занятий**

## Лабораторная работа №1

**Тема:** Построение гидрографа уровней воды.

- Цель работы:** 1) Построить гидрограф уровней за год.  
2) Изучить и нанести на гидрограф ледовые явления.  
3) Произвести выборку характерных уровней воды за год.

### *Краткие сведения из теории*

*Гидрометрия* является частью более обширной науки — гидрологии суши. Основными задачами гидрометрии являются: 1) разработка методов и приборов для количественного определения и учета элементов водного режима; 2) систематическое изучение гидрологического режима с целью получения многолетних характеристик уровней, стока воды и наносов, химического состава и температуры воды, ледовых явлений и др.

При исследовании водного режима рек и озер применяются стационарные и экспедиционные методы. Стационарные наблюдения ведутся на гидрометеорологических станциях (I и II разрядов) и постах (I, II, и III разрядов).

Разряды станциям и постам присваиваются в зависимости от объема выполняемой работы.

На *постах I разряда* ведутся наблюдения за уровнями и температурой воды, ледовыми явлениями, измеряют расходы воды, расходы взвешенных и донных наносов, производят отбор проб воды на мутность и для химического анализа, а также производят метеорологические наблюдения по программе метеорологических постов I разряда.

*Посты II разряда* ведут наблюдения по программе постов I разряда, за исключением измерения расходов воды, взвешенных и донных наносов.

*Посты III разряда* ведут наблюдения за уровнем и температурой воды, ледовыми явлениями и обстановкой.

Наблюдения проводятся в два срока — 8 и 20 часов.

Результаты наблюдений за годовой период по всем элементам водного режима помещаются в «Гидрологический ежегодник». Номер тома и выпуска ежегодника соответствует определенной территории, гидрометеорологические данные по которой помещены в этом ежегоднике.

По результатам наблюдений строятся комплексные графики результатов гидрометрических наблюдений в виде гидрографов. *Гидрограф* гидрометрической величины — это хронологический график изменения этой величины за рассматриваемый период (сутки, месяц, год и т.д.). Могут строиться гидрографы стока (расходы воды), уровней, температуры, расходов донных и взвешенных наносов и т.д.

Построенные гидрографы используются при проектировании гидромелиоративных систем, гидроузлов, водозаборных сооружений, транспортного, промышленного и другого использования поверхностных вод территории.

### Ход выполнения работы

1) В работе необходимо построить гидрограф уровней воды за годовой период. Для чего из гидрологических ежегодников выписываются исходные данные (таблицы «Ежедневные уровни воды»).

Для построения гидрографа уровня воды используется миллиметровая бумага стандартного формата. При этом по горизонтальной оси откладывается время (дни года  $t$ , сут., рекомендуемый масштаб 1мм-1сутки), а по вертикальной - значения уровней ( $H$ ), м (масштаб выбирается самостоятельно). Значения уровней наносятся на середину суток, т.е. посередине миллиметрового деления в выбранном масштабе (1мм-1сутки). Пример построения гидрографа уровней воды приведен на рисунке 1.3.

2) Весной и осенью на реках наблюдаются различные ледовые образования. В гидрологических ежегодниках в таблицах «Ежедневные уровни воды» они проставляются справа от значений уровней условными обозначениями (рисунок 1.1).

Необходимо изучить эти обозначения и при построении гидрографа уровней воды нанести их согласно рисунку 1.2. Нанесение ледовых явлений осуществляется на специально отведенной для этого горизонтальной линии, шириной 4-6мм над построенным гидрографом (см. рисунок 1.3).

3) Характерными уровнями воды являются:

- а) максимальный уровень (весеннего половодья или летне-осенних дождевых паводков);
- б) минимальный уровень (летне-осенней или зимней межени);
- в) средний уровень.

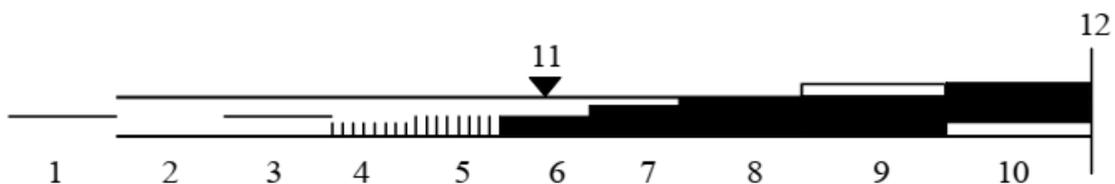
Характерные уровни наносятся на гидрограф с помощью горизонтальных линий с надписями на них соответствующих значений уровней (см. рисунок 1.3).

*При составлении годовой таблицы колебаний уровней, явления ледового режима и некоторые другие характеристики водного объекта отмечаются условными обозначениями, которые проставляются справа от значений уровня*

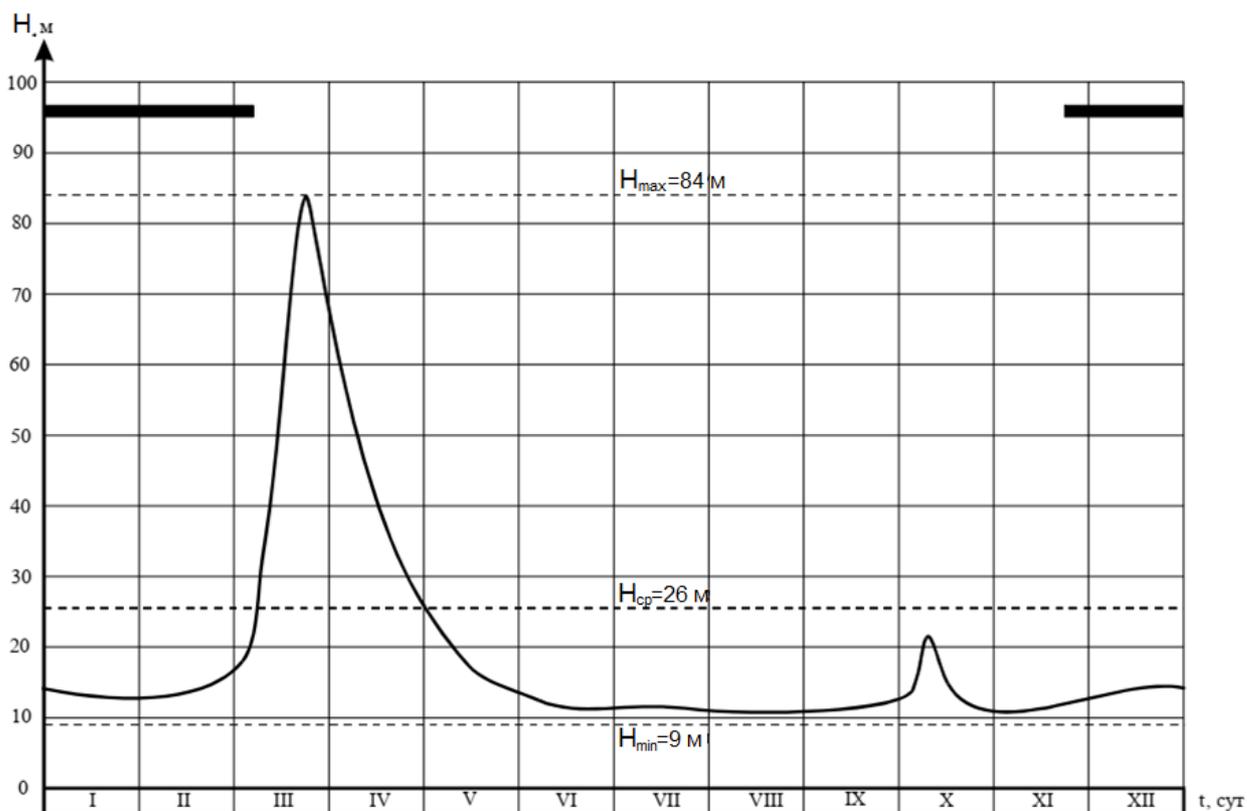
)	забереги		вода течет поверх льда
:	сало		
×	редкий шугоход	∫	закраина
Ж	густой шугоход	□	подвижка льда
○	редкий ледоход	▲	затор
●	густой ледоход	▣	первый и последний пароход
	ледостав	≠	начало и конец лесосплава

**Рисунок 1.1**

При построении графика средних суточных уровней воды аналогично рисунку 1.1 показывают фазы ледового режима условными обозначениями:



**Рисунок 1.2:** 1 — сало; 2 — забереги; 3 — сало при заберегах; 4 — редкий шугоход; 5 — шугоход; 6 — редкий ледоход; 7 — ледоход; 8 — неподвижный ледяной покров (ледостав); 9 — вода течет поверх льда; 10 — закраины и лед подняло; 11 — дата зажора или затора; 12 — дата подвижки льда.



**Рисунок 1.3** Гидрограф уровня воды на р.Нача — с.Горовцы за 1973 год

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №2

**Тема:** Построение поперечного профиля реки. Определение основных морфометрических характеристик русла.

**Цель работы:** 1) Построить поперечный профиль реки.  
2) Определить основные морфометрические характеристики русла.

### *Краткие сведения из теории*

В работе используются данные промеров по поперечным профилям. Этот вид измерений позволяет достаточно точно определить положение промерных точек и выявить распределение глубин по ширине реки.

Расстояние по вертикали от свободной поверхности потока до дна или расстояние в плоскости живого сечения от свободной поверхности потока до дна называют *глубиной потока (местной)*. Глубины измеряются гидрометрической штангой (наметкой), лотом и гидрометрическими профилографами.

*Гидрометрическая штанга* – круглый шест длиной до 7м и диаметром 5-6см с 10-сантиметровыми делениями. Ее можно применять только при сравнительно небольших глубинах (5-6м) и скоростях течения воды. Точность измерения глубины с помощью штанги – 2%. При глубинах более 6м применяют механические или ручные лоты.

*Ручной лот* представляет собой груз массой 3-6 кг конической или пирамидальной формы, подвешенный на размеченном шнуре (лотнине). Он применяется при небольших скоростях течения воды (до 1 м/с).

В *механическом лоте* используется гидрометрический груз, опускаемый в воду на тонком тросе с помощью лебедки. Применяют при любых скоростях течения потока. Если скорость очень велика, необходимо учитывать отклонение троса от вертикального положения.

*Гидрометрические профилографы* – приборы автоматической регистрации поперечного профиля водного сечения. Бывают механические, гидростатические и акустические.

Вертикали для измерения глубин воды в реках, водохранилищах и других водоемах называют *глубинными, или промерными, вертикалями*. Водные сечения, в которых располагаются глубинные (промерные) вертикали, называют *промерными сечениями, или промерными профилями*. Расстояния между промерными сечениями и глубинными вертикалями выбирают в зависимости от сложности подводного сечения. Чем сложнее рельеф, тем большая степень сгущения промерных сечений и глубинных вертикалей необходима для его изучения.

### *Ход выполнения работы*

1) Результаты промеров глубин записываются в журнал для записи промеров стандартного образца (см. приложения). По данным журнала (по номеру профиля, который назначается преподавателем) необходимо построить поперечный профиль реки, для чего вначале составляется таблица 2.1.

**Таблица 2.1** Таблица для построения поперечного профиля и вычисления морфометрических характеристик русла

Номера промерных вертикалей	Расстояние от постоянного начала, м	Глубина, м		Расстояние между вертикалями, м	Площадь водного сечения между вертикалями, м <sup>2</sup>	Отметка дна (абсолютная), м
		на вертикалях (рабочая)	средняя между вертикалями			
1	2	3	4	5	6	7
Ур.л.б.	10,0	0,00				215,12
			2,00	20,0	40,0	
1	30,0	4,00				211,12
			5,00	20,0	100	
2	50,0	6,00				209,12
			6,50	20,0	130	
3	70,0	7,00				208,12
...	...	...	...	...	...	...
8	170	5,00				210,12
			5,50	20,0	110	
9	190	6,00				209,12
			6,00	20,0	120	
10	210	6,00				209,12
			3,00	20,0	60,0	
Ур.п.б.	230	0,00				215,12
					Σ=1220	

Отметка дна (графа 7 таблицы 2.1) вычисляется как разность абсолютной отметки расчетного уровня воды и величины глубины на данной промерной вертикали.

Поперечный профиль реки строится по графам 1, 2, 3 таблицы 2.1 на миллиметровой бумаге стандартного формата (рекомендуется А4, 210x297мм). За постоянное начало выбирается точка, от которой откладывается расстояние от постоянного начала (в масштабе). Линия дна очерчивается прямыми линиями от одной промерной вертикали до другой. На линии поверхности воды выписывают уровень воды, к которому отнесены промеры глубин (см. рисунок 2.1)

2) Для поперечного профиля вычисляются следующие морфометрические характеристики:

*а) площадь водного сечения,  $F$ , м<sup>2</sup>.*

Рассчитывается аналитическим способом как сумма частных площадей между вертикалями по формуле:

$$F = \frac{h_1}{2} \cdot b_1 + \frac{h_1 + h_2}{2} \cdot b_2 + \dots + \frac{h_n}{2} \cdot b_{n+1}, \text{ м}^2 \quad (2.1)$$

где  $h_1, h_2, \dots, h_n$  — рабочая глубина на вертикалях, м;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  — расстояние между вертикалями, м.

Расчеты площади водного сечения выполняются в таблице 2.1 (графа 6). Общая площадь получается как сумма данных графы 6;

*б) ширина реки  $B$ , м.*

Определяется как разность расстояний от постоянного начала:

$$B = L_n - L_1, \text{ м}, \quad (2.2)$$

где  $L_n$  — расстояние от постоянного начала до уреза дальнего берега;  $L_1$  — расстояние от постоянного начала до уреза ближнего берега.

в) *средняя глубина сечения  $h_{cp}$ , м.*

Вычисляется как частное от деления площади водного сечения на ширину реки по формуле:

$$h_{cp} = \frac{F}{B}, \text{ м.} \quad (2.3)$$

г) *наибольшая глубина  $h_{max}$ , м.*

Выбирается из данных промерного журнала (графа 3 таблицы 2.1).

д) *смоченный периметр  $\chi$ , м.*

Длина линии дна реки на профиле, заключенная между урезами воды. Определяется по формуле:

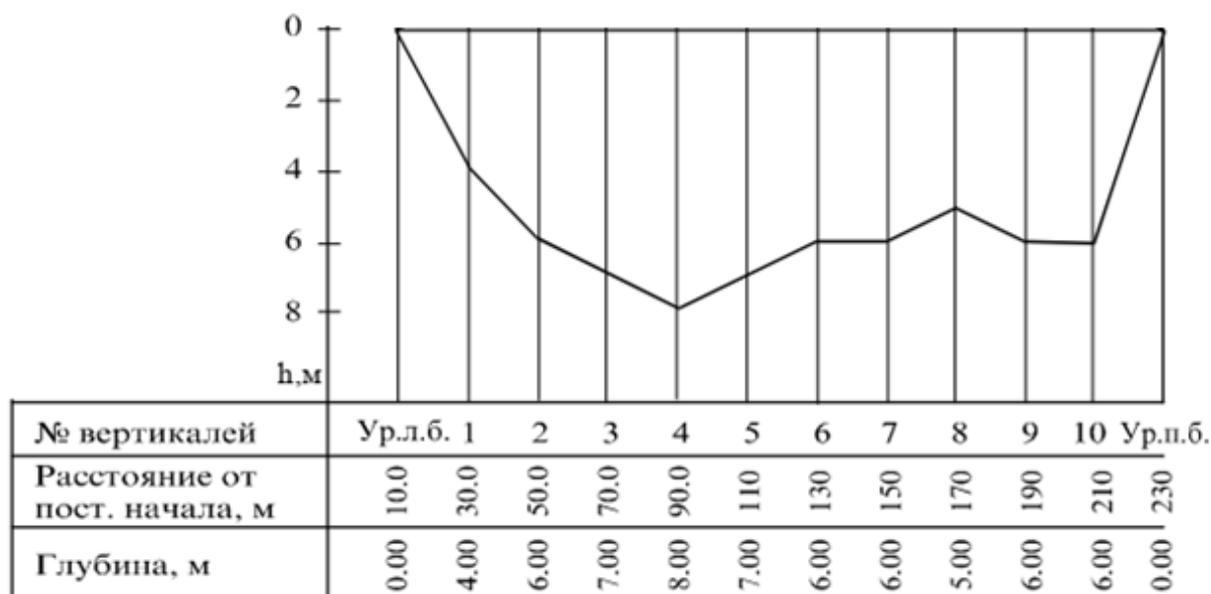
$$\chi = \sqrt{b_1^2 + h_1^2} + \sqrt{b_2^2 + (h_2 - h_1)^2} + \sqrt{b_3^2 + (h_3 - h_2)^2} + \dots + \sqrt{b_{n+1}^2 + h_n^2}, \text{ м.} \quad (2.4)$$

где  $b$  – расстояние между вертикалями, м;  $h$  – глубина на вертикалях (рабочая), м

е) *гидравлический радиус  $R$ , м.*

Определяется как частное от деления площади водного сечения на длину смоченного периметра:

$$R = \frac{F}{\chi}, \text{ м.} \quad (2.5)$$



**Рисунок 2.1** Поперечный профиль реки

[Вернуться в оглавление](#)

### Лабораторная работа №3

**Тема:** Вычисление расходов воды, измеренных гидрометрической вертушкой (аналитический способ).

**Цель работы:** 1) Вычислить расход  $Q$  в  $\text{м}^3/\text{с}$  аналитическим способом.

#### *Краткие сведения из теории*

Основными приборами для измерения скоростей течения воды в реках и каналах являются гидрометрические поплавки и гидрометрические вертушки.

В зависимости от измеряемой скорости гидрометрические поплавки подразделяют на точечные и интеграционные. Точечные поплавки бывают поверхностные и глубинные. В качестве *поверхностных поплавков* можно использовать бруски дерева, отпиленные от бревна цилиндрические кружки высотой 3-7см, соединенные крестом две доски и др. Продолжительность хода поплавков между створами при измерении наибольшей скорости должна быть не менее 20с.

Основные конструктивные элементы вертушек – рабочее колесо с осью вращения, корпус, счетно-контактный механизм и хвостовое оперение. По способу установки вертушки подразделяют на штанговые, тросовые и универсальные.

Вертикали, на которых измеряют местные скорости (средние скорости), называют *скоростными вертикалями*. Глубину, измеренную перед определением скоростей, называют *рабочей*. По ней устанавливают положение скоростных точек. Основным способом (при отсутствии ледяного покрова) является пятиточечный, при котором скорости измеряют: на поверхности, на глубине 0,2h, 0,6h, 0,8h и у дна. Этот способ обычно применяется при глубине более 1,5м. Затем, зная скорость течения воды и площадь поперечного сечения русла реки, можно определить расход.

*Расходом воды* называется количество воды, протекающее через поперечное сечение реки в одну секунду. Сущность аналитического метода определения расхода воды в реке заключается в следующем. Измеряется площадь поперечного сечения реки и скорость течения воды в отдельных точках на скоростных вертикалях. Вычисление расхода производится по приближенной формуле, которая представляет собой сумму частичных расходов между скоростными вертикалями:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n, \quad (3.1)$$

$$Q = k \cdot f_0 \cdot V_1 + \frac{V_1 + V_2}{2} \cdot f_1 + \dots + k \cdot V_n \cdot f_{n+1}; \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.2)$$

где  $V_1, V_2$  — средние скорости на вертикалях,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $f_0$  — площадь водного сечения между берегом и первой скоростной вертикалью,  $\text{м}^2$ ;  $f_{n+1}$  — площадь водного сечения между последней скоростной вертикалью и берегом,  $\text{м}^2$ ;  $f_1, f_2, \dots, f_n$  — площадь водного сечения между скоростными вертикалями,  $\text{м}^2$ ;  $k$  - эмпирический коэффициент (таблица 3.1).

**Таблица 3.1** Значения эмпирического коэффициента  $k$

Наименование	$k$
Пологий берег с нулевой глубиной на урезе	0,7
Обрывистый берег или неровная стенка	0,8
Гладкая стена	0,9
Наличие мертвого пространства	0,5

### **Ход выполнения работы**

Расчет расходов выполняется в таблице 3.3 (графа 5). При этом первое и последнее значение умножается на коэффициент  $k$ , который выбирается в зависимости от типа поперечного профиля у берегов реки (анализируется поперечный профиль реки — рисунок 2.1).

Средние скорости на вертикалях, при измерениях в пяти точках, при открытом русле вычисляются по эмпирической формуле:

$$V_{cp} = 0,1 \cdot (V_{пов} + 3 \cdot V_{0,2} + 3 \cdot V_{0,6} + 2 \cdot V_{0,8} + V_{дон}), \text{ м/с}, \quad (3.3)$$

где  $V_{cp}$  — средняя скорость на вертикали, м/с;  $V_{пов}$ ,  $V_{дон}$  — скорости на поверхности и дне реки на данной скоростной вертикали м/с;  $V_{0,2}$ ,  $V_{0,6}$ ,  $V_{0,8}$  — скорости на глубине  $0,2h$ ,  $0,6h$ ,  $0,8h$ .

Средние скорости, рассчитанные по формуле (3.3), заносятся в таблицу 3.3 (графа 3).

Скорости в отдельных точках на вертикали вычисляются по тарировочному уравнению:

$$V = 0,245 \cdot n + 0,05, \text{ м/с}, \quad (3.4)$$

где  $n$  — число оборотов вертушки в секунду, которое определяется по формуле:

$$n = \frac{N}{t}, \text{ об/с}, \quad (3.5)$$

где  $N$  — общее число оборотов за время наблюдения, об;  $t$  — общая продолжительность измерения в точке, с.  $N$  и  $t$  выписываются из приложений согласно выданному варианту.

Вычисления производим в таблицах 3.2 и 3.3.

**Таблица 3.2** К расчету скоростей течения воды на скоростных вертикалях

Номера скоростных вертикалей	Наименование точек	N, об	t, с	n, об/с	V, м/с	V <sub>ср.</sub> , м/с
1	2	3	4	5	6	7
	Поверхность					
	0,2h					
	0,6h					
	0,8h					
	Дно					
	Поверхность					
	0,2h					
	0,6h					
	0,8h					
	Дно					
	Поверхность					
	0,2h					
	0,6h					
	0,8h					
	Дно					
	Поверхность					
	0,2h					
	0,6h					
	0,8h					
	Дно					
	Поверхность					
	0,2h					
	0,6h					
	0,8h					
	Дно					

**Таблица 3.3** К вычислению расходов воды

Номера скоростных вертикалей	Средняя скорость, м/с		Площадь водного сечения между вертикалями, м <sup>2</sup>	Расход воды между вертикалями, м <sup>3</sup> /с
	на вертикалях	между вертикалями		
1	2	3	4	5
Ур.л.б	0,00			
Ур.п.б.	0,00			Σ

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №4

**Тема:** Вычисление расходов воды, измеренных гидрометрической вертушкой (графический способ).

**Цель работы:** 1) Определить расход  $Q$  в м<sup>3</sup>/с графическим способом.

### *Краткие сведения из теории*

В отличие от аналитического способа, вычисление расхода воды графическим способом позволяет более точно определить величину расхода воды.

*Расходом воды* называется количество воды, протекающее через поперечное сечение реки в одну секунду.

### *Ход выполнения работы*

При вычислении расхода воды графическим способом выполняются следующие построения (на листе миллиметровки стандартного формата):

1. Из лабораторной работы №2 (поперечный профиль реки) берутся значения глубин ( $h$ ) на скоростных вертикалях.

2. Вычерчиваются эпюры скоростей для каждой скоростной вертикали. Вертикальный масштаб берется такой, чтобы эпюра была не менее 3 см, а горизонтальный выбирается таким образом, чтобы отношение ( $V_{max}$ ) к ( $h$ ) (для центральной вертикали) было в пределах 0,05-0,1. На эпюрах справа выписываются значения скоростей в 5 точках (таблица 3.2, практическая работа №3), слева – значения глубин (пов., 0.2h, 0.6h, 0.8h, дно). Точки скоростей соединяются плавной линией.

3. Для каждой скоростной вертикали вычисляется средняя скорость ( $V_{cp}$ ), м/с

$$V_{cp} = F/h, \quad (4.1)$$

где  $F$  – площадь эпюры, вычисленная с учетом вертикального и горизонтального масштабов, м<sup>2</sup>/с;  $h$  – глубина на скоростной вертикали, м.

4. Полученные средние скорости ( $V_{cp}$ ) для скоростных вертикалей записываются в таблицу профиля, затем по этим значениям строится эпюра распределения средних скоростей по ширине реки.

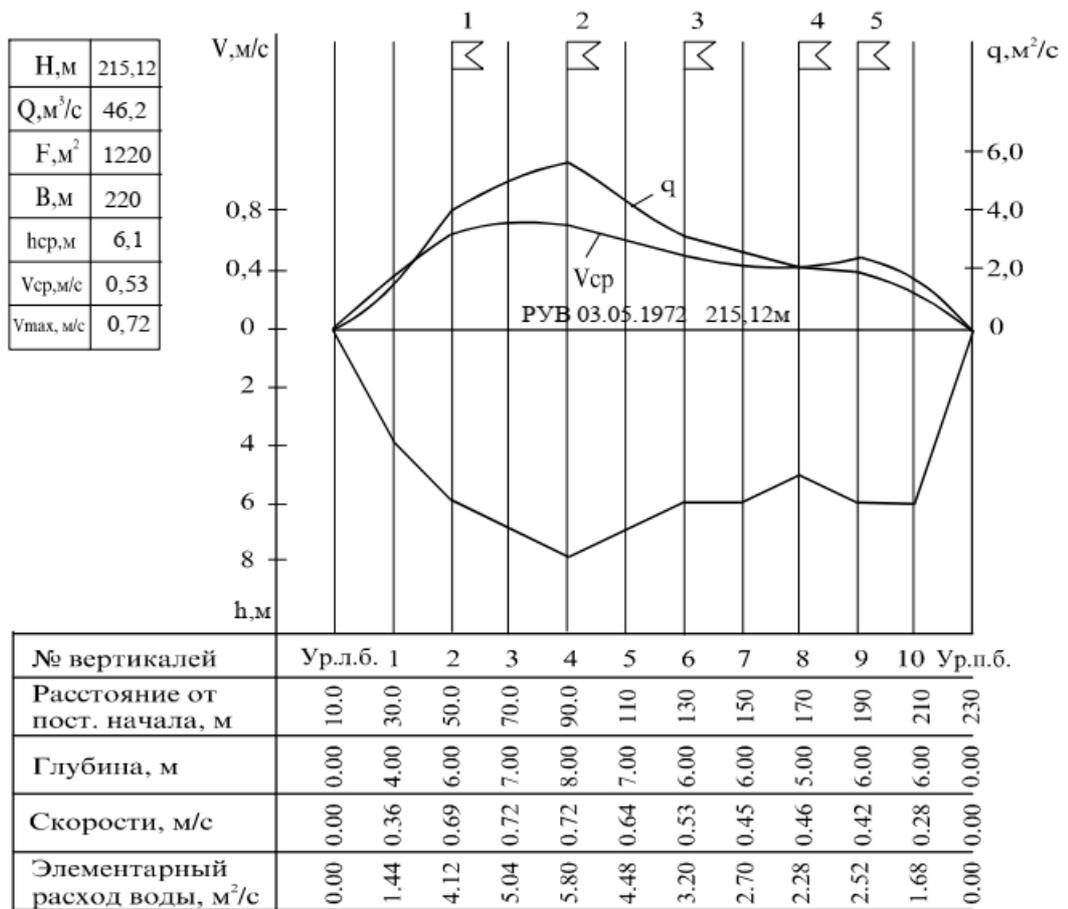
5. С эпюры снимаются средние скорости для всех промерных вертикалей с точностью 0,01 м/с и записываются в таблицу профиля.

6. Для каждой промерной вертикали определяется элементарный расход воды ( $q$ ), м<sup>2</sup>/с

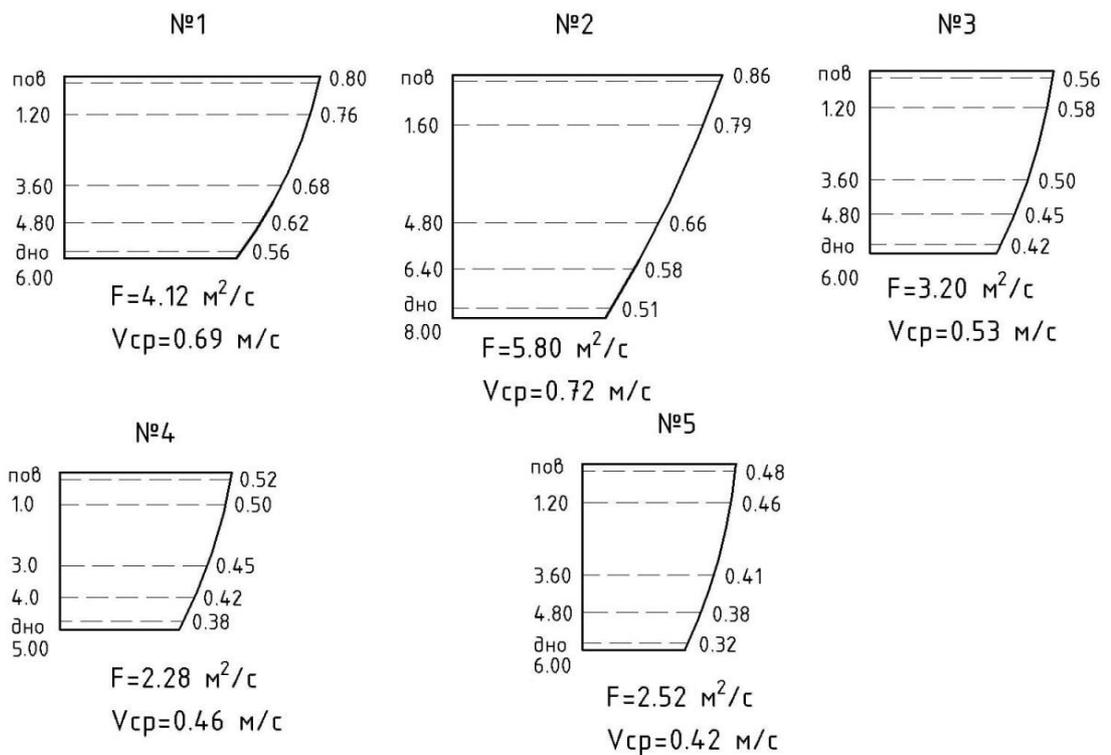
$$q = V_{cp} \cdot h. \quad (4.2)$$

7. По значениям элементарного расхода строится эпюра, показывающая изменение элементарных расходов по ширине реки.

8. Расход воды через поперечное сечение русла определяется как площадь эпюры элементарных расходов.



**Рисунок 4.1** Поперечный профиль реки



**Рисунок 4.2** Графический способ вычисления расходов воды

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №5

**Тема:** Построение кривых повторяемости и продолжительности уровней воды.

- Цель работы:** 1) Составить ведомость повторяемости и продолжительности уровней;  
2) Построить кривые повторяемости и продолжительности;  
3) Определить по кривым уровни заданной обеспеченности (25%, 75%).

### *Краткие сведения из теории*

*Повторяемость уровня* – число случаев (дней или лет) появления уровня в пределах какого-либо заданного интервала.

Повторяемость, выраженная в % от общей продолжительности рассматриваемого периода, называется *частотой*.

*Продолжительность уровня* – число дней (лет) в расчетном периоде, когда наблюдались уровни выше или равные данному уровню.

Продолжительность выражается в % от всего расчетного периода и называется *обеспеченностью* (P, %).

### *Ход выполнения работы*

А) Для составления ведомости повторяемости и продолжительности уровней воды используем данные из практической работы №1.

1. Определяется максимальное и минимальное значение уровня воды на исследуемой реке;

2. Вся амплитуда колебания уровня воды разбивается на 10 равных интервалов (графа 1);

3. Выбирается число дней повторения уровней в каждом интервале за каждый месяц (графы 2...13);

4. Вычисляется повторяемость за год, как сумма дней повторения уровня в интервале за все месяцы (графа 14);

5. Находится общая продолжительность рассматриваемого периода (частота) 14 графы и выражается в % повторение уровня каждого интервала (графа 15).

6. Величины, характеризующие продолжительность стояния уровня, в течение рассматриваемого периода, получаются путем суммирования в порядке возрастания значений повторяемости (графа 16);

7. Выражая в % продолжительность каждого интервала, определяется обеспеченность (графа 17).

## Ведомость

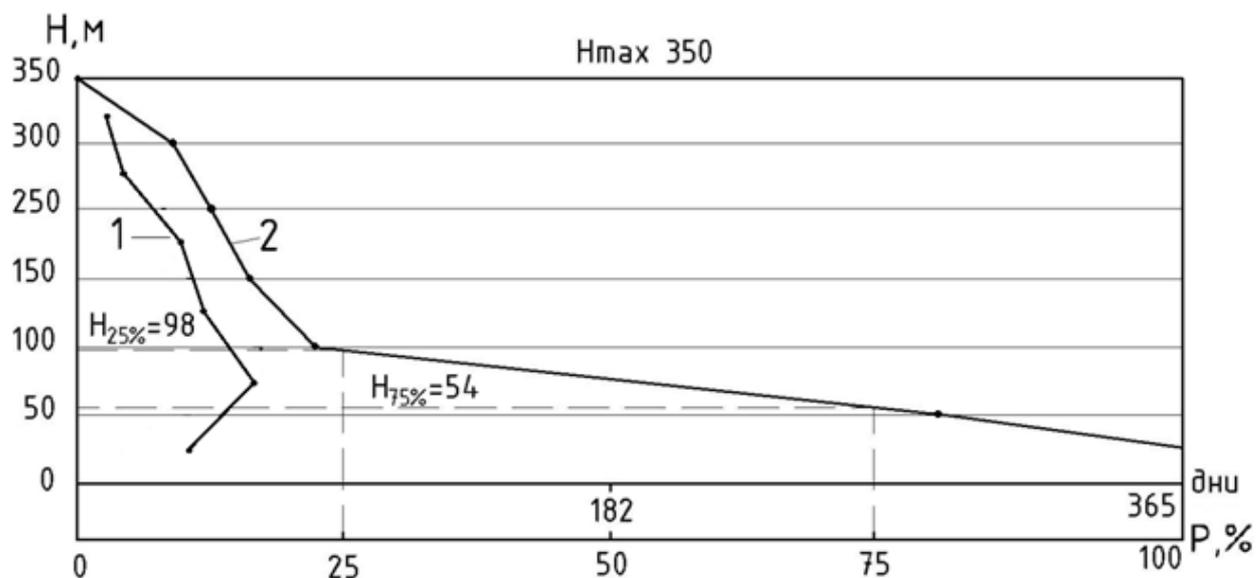
повторяемости и продолжительности уровней воды на реке.....

Интервалы уровня над нулем графика	Число дней стояния уровня в интервале по месяцам												Повторяе- мость (частота)		Продолжи- тельность (обеспеч.)		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	дни	%	дни	%	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
max.....																	
.....																	
.....																	
.....																	
.....																	
.....																	
.....																	
.....																	
.....min																365	100
Итого														365	100		

Б) Построение кривых повторяемости и продолжительности уровней выполняется:

- в днях - по данным граф 1, 14, 16;
- в % - по данным граф 1, 15, 17.

Повторяемость откладывается в середине интервала, продолжительность – в конце интервала.



*Рисунок 5.1 Кривые повторяемости (1) и продолжительности (2) уровня воды*

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №6

**Тема:** Определение расчетных величин среднегодовых расходов воды при отсутствии данных наблюдений.

**Цель работы:** 1) Определить годовой расход воды заданной вероятности превышения при отсутствии данных гидрометрических наблюдений и площади водосбора более 100 км<sup>2</sup>.

### Краткие сведения из теории

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений значения стока определяются следующими методами:

– по аналогии с окружающими реками, на которых имеются многолетние наблюдения за стоком с учетом влияния местных факторов (выходов грунтовых вод, особенностей геологического строения бассейна, характера почв, промерзания и пересыхания водотоков и др.);

– по эмпирическим формулам с использованием статистических параметров кривых распределения  $\bar{q}_o$ ,  $C_v$  и  $C_s$  или  $C_s/C_v$ . При этом  $\bar{q}_o$  и  $C_v$  определяются по картам изолиний приложения Л и П, а соотношение  $C_s/C_v$  принимается равным 2,0 – для рек бассейна Черного моря и 2,5 – для рек бассейна Балтийского моря.

Годовой расход расчетной обеспеченности определяется по зависимости

$$Q_p = \bar{q}_o \cdot A \cdot k_p \cdot 10^{-3}, \quad (6.1)$$

где  $\bar{q}_o$  – средний многолетний годовой модуль стока, л/с·км<sup>2</sup>;  $A$  – площадь водосбора до расчетного створа, км<sup>2</sup>;  $k_p$  – модульный коэффициент расчетной обеспеченности, определяемый по приложению Ж.1 [2] для трехпараметрического гамма-распределения или по зависимости  $k_p = \Phi_p \cdot C_v + 1$ , в которой число Фостера ( $\Phi_p$ ) принимается по приложению К для биномиального распределения.

Среднее многолетнее значение стока ( $\bar{q}_o$ ) по карте изолиний приложения Л определяется для центра тяжести водосбора неизученной реки путем прямолинейной интерполяции между изолиниями стока.

### Ход выполнения работы

Рассмотрим ход выполнения работы на конкретном примере.

а) Требуется определить среднегодовой расход воды обеспеченности 95% р. Мухавец - г. Пружаны. Площадь водосбора – 106 км<sup>2</sup>.

Расчет производится в следующем порядке:

1) по картам изолиний (приложение Л, П) [2] определяются значения нормы годового стока и коэффициент вариации:  $\bar{q}_o = 3,5$  л/с·км<sup>2</sup>,  $C_v = 0,43$ ; соотношение ( $C_s/C_v$ ) принимается равным 2,0 как для реки бассейна Черного моря;

2) значение ординаты обеспеченности 95% определяется по таблице кривых трехпараметрического гамма-распределения Ж.1 ( $k_{95\%} = 0,416$ );

3) по формуле (6.1) вычисляется расход воды обеспеченности 95%

$$Q_{95\%} = 3,5 \cdot 106 \cdot 0,416 \cdot 10^{-3} = 0,154 \text{ м}^3/\text{с}$$

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №7

**Тема:** Определение расчетных величин максимальных расходов воды весеннего половодья при отсутствии данных наблюдений.

**Цель работы:** Определить максимальный расход воды весеннего половодья обеспеченностью  $P=1; 5; 10; 25\%$ .

### Краткие сведения из теории

Расчет максимальных расходов воды производится на основе метода аналогии путем подбора водосбора с наличием данных наблюдений по стоку и сравнительно однообразных физико-географических условий формирования весеннего половодья.

Согласно Пособия к СНиП 2.01.14-83 расчетный максимальный расход воды весеннего половодья  $Q_p$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) заданной ежегодной вероятностью превышения  $P\%$  определяется по формуле

$$Q_p = \frac{K_0 \cdot h_p \cdot \mu \cdot \delta \cdot \delta_1 \cdot \delta_2}{(A+1)^{0.20}} \cdot A, \quad (7.1)$$

где  $K_0$  - параметр, характеризующий дружность весеннего половодья;  $h_p$  - расчетный слой суммарного (с учетом грунтового питания) стока, мм;  $\mu$  - коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов воды;  $\delta$  - коэффициент, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер;  $\delta_1, \delta_2$  - коэффициенты, учитывающие снижение максимального расхода воды, соответственно, в залесенных и заболоченных водосборах;  $A$  - площадь водосбора,  $\text{км}^2$ .

### Ход выполнения работы

Требуется определить максимальный расход воды весеннего половодья обеспеченностью  $P=1\%$  на р.Проня – с.Горки. Площадь водосбора –  $171 \text{ км}^2$ .

Расчет производится в следующем порядке:

1) Параметр характеризующий дружность весеннего половодья  $K_0$  определяется по рекам-аналогам. При отсутствии надежных аналогов можно использовать карту (рисунок 6.1).

2) расчетный слой стока ( $h_p$ ) определяется по формуле

$$h_p = K_p \cdot h_0, \quad (7.2)$$

где  $h_0$  - средний многолетний слой стока весеннего половодья (мм), определяемый по данным рек-аналогов или по картам изолиний приложения У [2], ( $h_0=93 \text{ см}$ );  $C_v$  - коэффициент вариации слоя стока, определяемый по картам изолиний приложения Ф [2], ( $C_v=0,43$ );  $C_s/C_v$  - для рек бассейна Западной Двины принимается -  $C_s=2C_v$ , для рек бассейна Немана и левобережных притоков Припяти -  $C_s=3C_v$ , для рек бассейнов Днепра, Сожа, Березены, правобережных притоков Припяти -  $C_s=4C_v$ , ( $C_s/C_v=4$ );  $K_p$  - модульный коэффициент расчетной обеспеченности, определяемый по приложению Ж.1 [2] для трехпараметрического гамма-распределения в зависимости от  $C_v$  и  $C_s/C_v$ , ( $K_{1\%}=2,45$ );

$$h_{1\%} = 2,45 \cdot 93 = 228 \text{ мм}.$$

3) Коэффициент ( $\mu$ ), учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимальных расходов воды, определяется по таблице 7.1, ( $\mu=1,0$ ).

Таблица 7.1 Значения коэффициента  $\mu$  учитывающего неравенство параметров слоя стока и максимальных расходов воды

Водосбор	Значения коэффициента $\mu$ при обеспеченности, в процентах, равной							
	1	2	3	5	10	25	50	75
Правобережные притоки р. Припяти	1,0	0,95	0,94	0,93	0,87	0,81	0,74	0,66
Остальные реки Беларуси	1,0	0,96	0,93	0,90	0,84	0,75	0,65	0,55

4) Коэффициент  $\delta$ , учитывающий снижение максимального стока рек, зарегулированных проточными озерами, определяется по формуле

$$\delta = \frac{1}{1 + c \cdot A_{оз}}, \quad (7.3)$$

где  $c$  - коэффициент, принимаемый в зависимости от среднего многолетнего слоя весеннего стока ( $h_o$ ). При  $h_o \geq 100$ мм,  $c=0,2$ ; при  $h_o=50$ мм,  $c=0,3$ ; при  $h_o$ , изменяющемся от 100 до 50 мм, ( $c$ ) получается интерполяцией, ( $c=0,214$ );  $A_{оз}$ - средневзвешенная озерность водосбора в процентах, определяется по картам, по основным гидрологическим характеристикам или принимается по методическим указаниям [ ], ( $A_{оз}=0$ ).

$$\delta = \frac{1}{1 + 0,214 \cdot 0} = 1,$$

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

$$\delta_1 = \frac{\alpha_1}{(A_{л} + 1)^{0.22}}, \quad (7.4)$$

где  $\alpha_1$  - параметр, учитывающий расположение леса на водосборе; принимается по таблице 6.3, ( $\alpha_1=1$ );  $A_{л}$  - залесенность водосбора, в процентах, ( $A_{л}=17\%$ ).

$$\delta_1 = \frac{1}{(17 + 1)^{0.22}} = 0,53,$$

Таблица 7.3 Значения параметра ( $\alpha_1$ ) в формуле (7.4)

Расположение леса на водосборе	Параметр $\alpha$ при $A_{л}$ , в %, равном		
	3-9	10-19	20-30
равномерное	1,0	1,0	1,0
в верхней части водосбора	0,85	0,80	0,75
в нижней и прирусловой части водосбора	1,20	1,25	1,30

6) Коэффициент  $\delta_2$ , учитывающий снижение максимального расхода воды заболоченных водосборов, определяется по формуле

$$\delta_2 = 1 - \beta \cdot \lg(0,1 \cdot A_{б} + 1), \quad (7.5)$$

где  $\beta$  - коэффициент, учитывающий тип болот и преобладающий механический состав почв (грунтов) вокруг болота и заболоченных земель; принимается по таблице 7.4 ( $\beta=0,3$ );  $A_6$  - заболоченность водосбора, в процентах, ( $A_6=2\%$ ).

$$\delta_2 = 1 - 0,3 \cdot \lg(0,1 \cdot 2 + 1) = 0,98.$$

Таблица 7.4 Значение коэффициента ( $\beta$ ) в формуле (7.5)

Типы болот и почвогрунтов на их водосборах	$\beta$
Низинные болота и заболоченные леса и луга на водосборах, сложенных супесчаными и легкосуглинистыми почвами (грунтами)	0,8
Болота разных типов на водосборе	0,7
Верховые болота на водосборах, сложенных супесчаными и легкосуглинистыми почвами (грунтами)	0,5
Верховые болота на водосборах, сложенных среднесуглинистыми и глинистыми почвами (грунтами)	0,3

7) по формуле 7.1 вычисляется максимальный расход воды весеннего половодья 1%-ной обеспеченности

$$Q_{1\%} = \frac{0,008 \cdot 227,85 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,53 \cdot 0,98}{(171+1)^{0,20}} \cdot 171 = 57,8 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

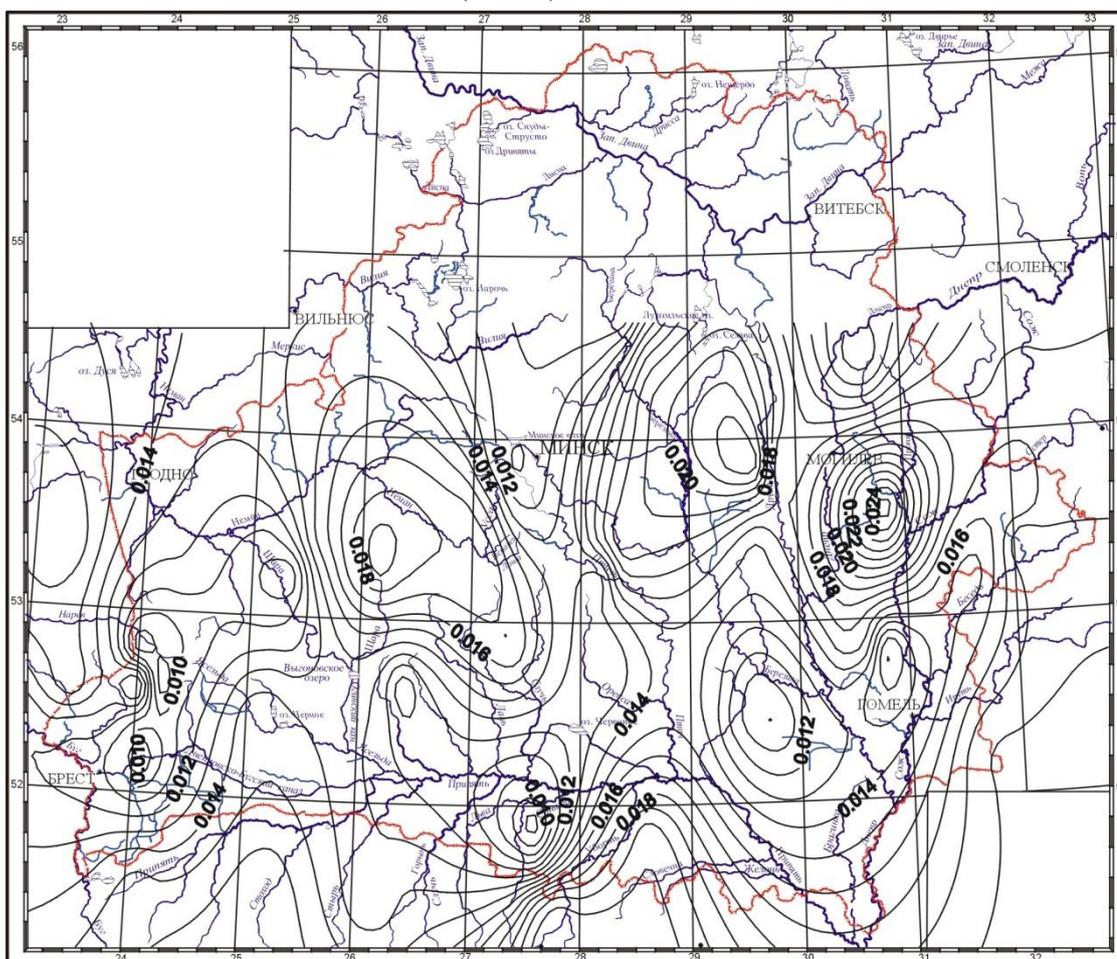


Рисунок 7.1 Карта параметра «дружности» половодья ( $K_0$ ) для Белорусского Полесья и прилегающих территорий

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №8

**Тема:** Определение расчетных расходов воды летне-осенних дождевых паводков при отсутствии данных наблюдений.

**Цель работы:** 1 Определить расходы воды дождевых паводков при невозможности подобрать реку-аналог обеспеченностью  $P=10\%$ .

### Краткие сведения из теории

При невозможности подобрать реку-аналог и площади водосбора более  $50 \text{ км}^2$ , максимальные мгновенные расходы воды дождевых паводков 10%-ной обеспеченности определяются по формуле

$$Q_p = \frac{a_{10\%} \cdot \delta \cdot \lambda_p}{\Phi^{0,8}} \cdot A, \quad (8.1)$$

где  $a_{10\%}$  - параметр, характеризующий модуль максимального мгновенного расхода воды 10%-ной обеспеченности, определяется интерполяцией между данными наблюдений соседних гидрологически-изученных рек в исследуемом районе или по карте приложения X [2];  $A$  - площадь водосбора до расчетного створа,  $\text{км}^2$ ;  $\lambda_p$  - переходной коэффициент от максимальных расходов воды дождевых паводков, 10%-ной вероятностью превышения, к максимальным расходам другой вероятностью превышения, принимается по таблице 8.1

*Таблица 8.1 Переходные коэффициенты  $\lambda_p$  в формуле (8.1)*

Вероятность превышения, в процентах	1	2	3	5	10	25
Переходной коэффициент	1,96	1,65	1,47	1,29	1,0	0,64

$\delta$  - коэффициент, учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер, определяется по формуле 7.3;  $\Phi$  - морфологическая характеристика русла, определяется по формуле

$$\Phi = \frac{1000 \cdot L}{m_p \cdot i_p^{1/3} \cdot A^{1/4}} \quad (8.2)$$

где  $m_p$  - гидравлический параметр русла, принимаемый по таблице 8.2

*Таблица 8.2 Параметр  $m_p$  в формуле (8.2)*

Характеристики русл и пойм	$m_p$ , м/мин
Чистые русла постоянных равнинных рек; русла периодически пересыхающих водотоков	11
Извилистые, частично заросшие русла больших и средних рек; периодически пересыхающие водотоки, несущие во время паводка большое количество наносов	9
Сильно засоренные и извилистые русла периодически пересыхающих водотоков	7

$i_p$  – средневзвешенный уклон русла реки, ‰;  $L$  – длина реки, км;  $A$  – площадь водосбора,  $\text{км}^2$ .

### *Ход выполнения работы*

Рассмотрим ход выполнения работы на конкретном примере.

Требуется определить на р.Проня - с.Горки максимальный мгновенный расход воды дождевых паводков 10%-ной обеспеченности при невозможности подобрать реку-аналог и площади водосбора более 50 км<sup>2</sup>. Площадь водосбора 171 км<sup>2</sup>.

Расчет производится в следующем порядке:

1) по карте изолиний (приложение X) определяется параметр ( $a_{10\%}$ ), характеризующий модуль максимального мгновенного расхода воды 10%-ной обеспеченности, ( $a_{10\%}=12,2$ );

2) по формуле 7.3 вычисляется коэффициент ( $\delta$ ), учитывающий влияние водохранилищ, прудов и проточных озер

$$\delta = \frac{1}{1 + c \cdot A_{оз}} = \frac{1}{1 + 0,214 \cdot 0} = 1;$$

3) по таблице 8.1 определяется переходной коэффициент ( $\lambda_p$ ) от максимальных расходов воды дождевых паводков, 10%-ной вероятностью превышения, к максимальным расходам другой вероятностью превышения, ( $\lambda_{10\%}=1,0$ );

4) по формуле 8.2 определяется морфологическая характеристика русла ( $\Phi$ ), где гидравлический параметр русла ( $\chi_p$ ), принимается по таблице 8.2, ( $m_p=11$  м/мин)

$$\Phi = \frac{1000 \cdot 27}{11 \cdot 1,1^{1/3} \cdot 171^{1/4}} = 657,54$$

5) по формуле 8.1 определяется расходы воды 10%-ной обеспеченности

$$Q_{10\%} = \frac{12,2 \cdot 1 \cdot 1}{657,54^{0,8}} \cdot 171 = 11,61 \text{ м}^3 / \text{с}$$

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №9

**Тема:** Определение расчетных расходов воды предпосевного периода при отсутствии данных наблюдений.

**Цель работы:** 1 Определить расходы воды предпосевного периода при невозможности подобрать реку-аналог обеспеченностью  $P=10\%$ .

### Краткие сведения из теории

Расчетные расходы предпосевного стока определяют пропускную способность проводящих каналов и рек - водоприемников осушительных и осушительно-увлажнительных систем на момент оптимального срока сева ранних яровых зерновых культур (начало посевного периода).

Оптимальный срок сева ранних яровых зерновых культур является биоклиматической характеристикой и календарная дата его наступления ежегодно изменяется.

Расчетные расходы воды предпосевного периода ( $Q_{10\%}$ ), м<sup>3</sup>/с, определяются:

$$Q_{10\%} = A_{10\%}^{mn} \cdot A \cdot \delta_A \cdot \delta_{(A_б+A_л)} \cdot \delta_{оз} \cdot \delta_{\Delta T} \cdot 10^{-3}, \quad (9.1)$$

где  $A_{10\%}^{mn}$  - параметр, представляющий собой модуль предпосевного стока с единицы площади водосбора, л/(с·км<sup>2</sup>);  $A$  - площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $\delta_A$  - коэффициент, отражающий возрастание модуля предпосевного стока с увеличением площади водосбора;  $\delta_{(A_б+A_л)}$  - коэффициент учета влияния заболоченности и лесистости;  $\delta_{оз}$  - коэффициент учета влияния озерности;  $\delta_{\Delta T}$  - коэффициент, учитывающий неодновременность схода снега по водосбору.

Параметр ( $A_{10\%}^{mn}$ ) определяется при отсутствии реки-аналога - по прилож. Ю.

Коэффициент ( $\delta_A$ ), отражающий влияние площади водосбора, определяется по формуле

$$\delta_A = \left( \frac{A_p}{200} \right)^{0,16}, \quad (9.2)$$

где -  $A_p = A$  при  $A < A_{кр}^{noc}$  или  $A_p = A_{кр}^{noc}$  при  $A > A_{кр}^{noc}$  ;

$A$  - общая площадь водосбора, км<sup>2</sup>;  $A_p$  - расчетная площадь водосбора, км<sup>2</sup>, в пределах которой модули предпосевного стока возрастают;  $A_{кр}^{noc}$  - критическая площадь водосбора, км<sup>2</sup>, определяется по таблице 9.1.

*Таблица 9.1 - Величина ( $A_{кр}^{noc}$ ) в зависимости от заболоченности и залесенности водосбора ( $A_б+A_л$ )*

$(A_б+A_л)$ , %	70	60	50	40	30	20	10
$(A_{кр}^{noc})$ , км <sup>2</sup>	200	1000	1800	2600	3400	4200	5000

Коэффициент, учитывающий влияние заболоченности и залесенности, определяется по формуле

$$\delta_{(A_6+A_{л})} = 1 + 0,0003 \cdot h_0 \cdot (A_6 + A_{л}), \quad (9.3)$$

где  $h_0$  - средний многолетний слой стока весеннего половодья, мм;  $A_6$ ,  $A_{л}$  - заболоченность и залесенность, в %.

Коэффициент учета влияния озерности определяется в зависимости от величины средневзвешенной озерности ( $A_{оз}$ ):

а) при средневзвешенной озерности  $A_{оз} \leq 5$  % - по формуле

$$\delta_{оз} = 1 + 0,01 \cdot A_{оз}; \quad (9.4)$$

б) при средневзвешенной озерности  $A_{оз} > 5$  % — по формуле

$$\delta_{оз} = 1,5 - 0,02 \cdot (A_{оз} - 5). \quad (9.5)$$

Расчеты по формулам (9.4), (9.5) производятся при суммарной заболоченности и залесенности меньше 30 %. При суммарной заболоченности и залесенности более 50 % принимается  $\delta_{оз} = 1,0$ . Если общая заболоченность и залесенность ( $30\% < (A_6 + A_{л}) < 50\%$ ), то величина ( $\delta_{оз}$ ) определяется интерполяцией между значением, вычисленным по формулам, и  $\delta_{оз} = 1,0$ .

Коэффициент неодновременности схода снега по водосбору ( $\delta_{\Delta T}$ ) определяется по таблице 9.2 в зависимости от ( $\Delta T$ ) - числа дней фактического отклонения средних дат схода снежного покрова в расчетном створе и в центре тяжести водосбора (даты принимаются по приложению Я) с учетом совпадения (+ $\Delta T$ ) или несовпадения (- $\Delta T$ ) средних дат схода снега.

Таблица 9.2 — Коэффициент неодновременности схода снега ( $\delta_{\Delta T}$ )

Отклонение средних дат схода снега в центре водосбора и в расчетном створе ( $\pm \Delta T$ ), дней	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2
Коэффициент $\delta_{\Delta T}$	2,0	1,7	1,45	1,2	1,0	1,0	1,0	0,9

### Ход выполнения работы

Требуется определить расход воды предпосевного периода р. Саморувка у д. Зарудье вероятностью превышения  $P=10\%$  со следующими характеристиками водосбора:  $A = 74 \text{ км}^2$ ;  $A_6 = 6,0$  %;  $A_{л.з} = 3,0$ ;  $A_{л.с} = 11$  %;  $A_{оз} = 0$ ;  $\Delta T = +1$  день.

Расчет производится в следующем порядке:

1) по карте изолиний (прилож. Ю) определяется параметр  $A_{10\%}^{nn} = 9,0 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ ,

2) по карте изолиний (приложение У) определяется средний слой весеннего стока ( $h_0 = 50$  мм) и по формуле (9.3) вычисляется коэффициент, учитывающий влияние заболоченности и залесенности

$$\delta(A_6 + A_{л}) = 1 + 0,003 \cdot 50 \cdot (9 + 11) = 1,3;$$

3) по формуле (9.2) определяется ( $\delta_A$ ), при  $A_p = A$ , так как  $A < A_{кр}^{noc}$   
(по таблице 9.1  $A_{кр}^{noc} = 4200 \text{ км}^2$ )

$$\delta_A = \left( \frac{74}{200} \right)^{0,16} = 0,85;$$

4)  $A_{оз} = 0$ ,  $\delta_{оз} = 1,0$ ;

5) коэффициент неодновременности стока снега по водосбору  $\delta_{\Delta T} = 1,0$   
(таблица 9. 2);

6) расчетный расход воды предпосевного стока определяется по формуле (9.1)

$$Q_{10\%} = 9,0 \cdot 74 \cdot 0,85 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} = 0,736 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

[Вернуться в оглавление](#)

## Лабораторная работа №10

**Тема:** Определение расчетных величин среднемеженных расходов воды при отсутствии данных наблюдений.

**Цель работы:** 1 Определить величину среднемеженного стока при невозможности подобрать реку-аналог обеспеченностью  $P=50\%$ .

### *Краткие сведения из теории*

Среднемеженный сток является расчетным видом стока, определяющим условия сопряжения элементов регулирующей и проводящей сети осушительных и осушительно-увлажнительных систем в вертикальной плоскости в период летне-осенней межени.

Расчетные расходы среднемеженного стока ( $Q_{ср.м}$ ),  $м^3/с$ , определяются по формуле

$$Q_{ср.м} = \bar{q}_{меж} \cdot A \cdot 10^{-3}, \quad (10.1)$$

где  $\bar{q}_{меж}$  - средний многолетний модуль среднемеженного стока,  $л/(с \cdot км^2)$ , принимаемый по данным рек-аналогов;  $A$  - расчетная площадь водосбора,  $км^2$ .

Величины расходов воды среднемеженного стока ежегодной вероятностью превышения 50 % при отсутствии рек-аналогов принимаются по приложению 1.

### *Ход выполнения работы*

Требуется рассчитать среднемеженный расход воды обеспеченности 50% р.Саморувки у д. Зарудье со следующими характеристиками водосбора:  $A = 74 км^2$ ;  $A_б = 6\%$ ;  $A_{л.з} = 3,0 \%$ ;  $A_{л.с} = 11\%$ ; на водосборе проведены мелиоративные работы; длина открытой мелиоративной сети равна 66,7 км; осушенные земли преимущественно - торфяные.

Расчет производится в следующем порядке:

1) по карте изолиний (приложение 1) определяется среднемеженный модуль стока обеспеченности 50%:  $\bar{q}_{меж} = 1,8 л/с \cdot км^2$ ;

2) по формуле (10.1) вычисляется среднемеженный расход воды обеспеченности 50%

$$Q_{50\%} = 1,8 \cdot 74 \cdot 10^{-3} = 0,13 м^3 / с$$

[Вернуться в оглавление](#)

**3 Раздел контроля знаний**  
**Перечень вопросов выносимых на экзамен**  
**по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока»**

1. Предмет гидрологии, связь с другими науками.
2. Основные этапы развития гидрологической науки.
3. Круговорот воды в природе и водные ресурсы Земли в целом и отдельных ее частей.
4. Водные ресурсы Республики Беларусь.
5. Водный баланс речных бассейнов.
6. Реки и их формирование. Строение гидрографической (русловой) сети.
7. Истоки и устья водотоков.
8. Общие сведения о структуре речного русла.
9. Морфологические элементы русла реки.
10. Морфометрические характеристики русла реки.
11. Продольный и поперечный профиль реки.
12. Фазы водного режима речного стока.
13. Понятие гидрографа стока. Типы питания рек.
14. Расчленение гидрографа стока по видам питания.
15. Классификация рек по типам водного режима рек.
16. Наблюдения за ледовыми явлениями на реках.
17. Виды и периоды ледовых явлений.
18. Движение воды в реках. Эпюры скоростей в различных частных случаях.
19. Определение средней скорости на вертикали в открытом русле.
20. Происхождение, характеристики и классификация речных наносов.
21. Движение влекомых наносов. Закон Эри.
22. Движение и сток взвешенных наносов.
23. Селевые паводки. Основные характеристики селей.
24. Антропогенное воздействие на режим рек и речной сток.
25. Развитие русловых процессов в условиях зарегулированного режима.
26. Заиление и занесение водохранилищ.
27. Изменение русловых процессов при преобразовании русел рек.
28. Влияние урбанизации на русловые процессы.
29. Понятие и назначение гидрологических расчетов.
30. Расчеты стока при наличии данных наблюдений. Кривая обеспеченности.
31. Расчеты стока при недостаточности данных наблюдений.
32. Внутригодовое распределение стока.

33. Типы водохранилищ. Влияние водохранилищ на окружающую среду.
34. Образование и развитие болот.
35. Методы измерения скорости течения воды. Гидрометрическая вертушка.
36. Измерения скорости течения воды. Поплавковый способ.
37. Наблюдения за уровнями воды. Организация и оборудование водомерных постов.
38. Сущность и задачи измерения глубин. Приборы и оборудование для измерения глубин.
39. Способы выполнения промерных работ.
40. Мертвый объем. Основные критерии по определению мертвого объема водохранилища.
41. Изменчивость годового стока. Определение коэффициента изменчивости (вариации) методом наибольшего правдоподобия.

[Вернуться в оглавление](#)

#### **4 Вспомогательный раздел**

**Учебная программа по дисциплине «Инженерная гидрология и регулирование стока» для специальности - 74 05 01 «Мелиорация и водное хозяйство»**

Учреждение образования  
«Брестский государственный технический университет»

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый проректор БрГТУ

\_\_\_\_\_ А.М.Омельянюк

«    » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Регистрационный № УД- \_\_\_\_\_ /уч.

**ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА**

**Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности**

1-74 05 01

Мелиорация и водное хозяйство

2019 г.

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта по специальности 1-74 05 01 Мелиорация и водное хозяйство

**СОСТАВИТЕЛЬ:**

Стефаненко Ю.В., доцент кафедры природообустройства, кандидат технических наук, доцент

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

М.А.Богдасаров, заведующий кафедрой географии и природопользования учреждения образования «Брестский государственный университет имени А.С.Пушкина», д.г-м.н., профессор

А.А.Волчек, декан факультета инженерных систем и экологии учреждения образования «Брестский государственный технический университет», д.г.н., профессор

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой природообустройства  
(название кафедры-разработчика программы)  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_);

Методической комиссией факультета инженерных систем и экологии  
(название факультета)  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_);

Председатель \_\_\_\_\_ Ан.А.Волчек  
(ФИО, подпись)

Советом Брестского государственного технического университета  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_);

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Дисциплина «Инженерная гидрология и регулирование стока» имеет важное значение для подготовки инженеров-мелиораторов широкого профиля. Гидрологические исследования и гидрологические наблюдения являются важнейшим этапом изысканий при проектировании, а гидрологические и водохозяйственные расчеты – обязательной частью проекта любого гидротехнического сооружения, гидромелиоративной системы, включая дороги, они имеют большое значение при решении проблемы рационального и комплексного использования водных ресурсов, их охрана.

В состав учебной работы по дисциплине входят аудиторные занятия (лекции, практические, лабораторные). Изучение дисциплины завершается учебной практикой.

### **Цель преподавания дисциплины:**

Дать студентам необходимые знания о факторах и закономерностях формирования речного стока; режимах рек, озер, болот; способах и технических средствах измерения и определения основных гидрологических характеристик водотоков и водоёмов; теоретических основах и методах инженерных гидрологических и водохозяйственных расчетов, научить их применению этих методов при проектировании и эксплуатации гидромелиоративных систем и гидросооружений, анализу и оценке получаемых результатов.

Знания по инженерной гидрологии и регулированию стока необходимы при изучении специальных дисциплин: комплексное использование водных ресурсов, сельскохозяйственные мелиорации, гидротехнические сооружения, эксплуатация и мониторинг мелиоративных и водохозяйственных систем, экономика водного хозяйства, а также при работе над дипломным проектом и в последующей производственной деятельности специалиста в проектных, строительных и эксплуатационных организациях.

### **Задачи изучения дисциплины:**

- получить четкое представление о закономерностях формирования речного стока, питания и водном режиме рек, озер и болот, водной эрозии и русловых процессах;

- изучить способы и приборы, применяемые при гидрометрических измерениях на реках и учете воды на гидромелиоративных системах, приобрести навыки самостоятельного выполнения основных видов гидрометрических работ;

- овладеть приемами и способами получения, обработки, анализа и оценки достоверности материалов гидрометрических измерений и гидрологической информации;

- освоить методы расчета основных гидрологических характеристик, используемых при проектировании гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений;

- знать общую методику и уметь выполнять расчеты по регулированию речного стока водохранилищами;

- иметь полное представление о задачах и основных правилах эксплуатации водохранилищ, влиянии их на окружающую природную среду, мероприятиях по предотвращению и ликвидации отрицательных последствий регулирования стока;

- уметь оценить народохозяйственное значение и экономическую эффективность мероприятий по регулированию стока.

**Студент должен знать:**

- факторы, влияющие на сток рек и круговорот воды в природе, сведения по гидрографии рек;

- способы и приборы, применяемые при гидрометрических измерениях на реках;

- приемы и способы получения, обработки, анализа и оценки достоверности материалов гидрометрических наблюдений и измерений".

**Студент должен уметь:**

- ставить и решать задачи, связанные с проектированием и расчетом систем водоснабжения, водоотведения, очистки вод;

- владеть методами расчета годового стока, внутригодового распределения, максимальных и минимальных расходов при наличии и отсутствии данных наблюдений.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

### Введение

Предмет гидрологии и регулирования стока, связь с другими дисциплинами. Краткая история развития гидрологических наук. Значение гидрологии и регулирования стока для развития экономики, комплексного использования водных ресурсов и их охраны. Организация гидрометрических работ и государственный учет вод.

### Общая гидрология суши

**Круговорот воды в природе и водный баланс.** Водный баланс земного шара. Внутриматериковый влагооборот. Водный баланс речных бассейнов. Связь теплового и водного балансов суши. Влияние антропогенной деятельности на водные ресурсы. Охрана водных ресурсов.

**Физико-географические факторы стока.** Атмосферные осадки, их вида и классификация. Измерение осадков. Расчетные характеристики осадков. Зимние осадки. Распределение осадков по территории. Определение среднего количества осадков для бассейна реки. Испарение. Испарение с водной поверхности, снега и льда, с поверхности почвы и растительного покрова. Суммарное испарение. Измерение и расчет испарения.

**Речная система.** Гидрографические характеристики речной системы: длина реки, густота речной сети, извилистость и разветвленность рек. Речной бассейн. Поверхностный и подземный водосборы. Гидрографические характеристики речного бассейна.

Речная долина. Русло и пойма реки. Плесы и перекаты. Продольный и поперечный профиль реки.

### Гидрометрия.

**Уровни воды.** Гидрологический пост. Размещение гидрологических постов и станций. Выбор участка для гидрологического поста. Перенос постов. Методика измерения уровней воды на гидрологических постах. Нуль графика поста. Уровнемеры: речные, свайные, самописцы уровня воды и др. Определение продольных уклонов свободной поверхности воды.

Обработка материалов наблюдений за уровнями воды. Графики, колебания уровней, повторяемости и продолжительности.

Измерение температуры воды, прозрачности и цвета воды, толщины льда, шуги и снега на льду.

**Глубины воды.** Приборы для измерения глубин воды:

гидрометрические штанга, лот, эхолот. Способы измерения глубин (по поперечникам, продольникам, косым галсам). Расположение промерных сечений и вертикалей.

Обработка материалов по измерению глубин воды. Приведение глубин к мгновенному уровню воды. План водотока в изобатах.

**Скорости течения воды.** Распределение скоростей течения в речном потоке. Живое и водное сечение потока. Распределение осредненных местных скоростей течения. Средняя скорость на вертикали. Изотахи. Приборы для измерения скоростей течения воды: гидрометрические поплавки, вертушки, ультразвуковые измерители скорости. Градуирование приборов для измерения скоростей течения воды. Градуировочные кривые, их построение. Способы измерения скоростей, течения воды гидрометрической вертушкой, поплавками.

**Расходы воды.** Общие принципы определения расходов воды. Гидрометрический створ и определение его направления. Классификация методов определения расходов воды. Объемный и весовой методы. Метод "площадь-скорость" Определение расходов воды по уклону и живому сечению потока. Способ смешения.

**Связь между уровнями и расходами воды** Кривые расходов воды, площадей живых сечений и средних скоростей. Однозначная и неоднозначная зависимости уровней от расходов воды. Кривые расходов при наличии ледовых явлений, водной растительности, деформирующемся русле, неустановившемся движении воды (паводочные волны). Экстраполяция кривых расходов воды. Вычисление ежедневных расходов и стока воды.

**Расходы и сток наносов.** Определение расходов и стока взвешенных наносов. Мутность воды, приборы и способы ее измерения. Определение расходов и стока влекомых наносов. Измерения расходов наносов с помощью донных батометров.

**Техника безопасности при гидрометрических работах.** Особенности техники безопасности при работе на реках и водохранилищах в различные периоды года. Меры безопасности при гидрометрических работах на водных объектах при больших скоростях течения, ветровом волнении, ледоходе, проходе судов и т.д.

## **Гидрологические расчеты**

**Общие сведения о гидрологических расчетах.** Генетические и статистические методы исследований речного стока. Обоснование применения статистических методов в гидрологии. Расчетные гидрологические характеристики.

**Статистические методы исследований и расчетов стока.** Кривые распределения гидрологических характеристик. Обеспеченность

гидрологической характеристики. Кривые обеспеченности. Параметры кривых распределения и обеспеченности; методы их определения. Аналитические и эмпирические кривые обеспеченности. Клетчатка вероятности. Определение границ доверительных интервалов для наибольшего и наименьшего членов ряда наблюдений. Корреляция. Уравнения регрессии.

**Годовой сток рек.** Факторы формирования годового стока. Среднее многолетнее значение (норма) годового стока. Расчет нормы годового стока при наличии многолетних гидрометрических наблюдений. Оценка однородности и репрезентативности гидрологических рядов. Допустимая погрешность при вычислении нормы стока по многолетнему ряду.

Расчет нормы годового стока при недостаточности данных наблюдений. Приведение расчетных гидрологических параметров к многолетнему периоду по данным рек-аналогов с продолжительными рядами наблюдений.

Определение нормы стока при отсутствии гидрометрических наблюдений.

Изменчивость годового стока. Определение расчетных значений годового стока при наличии, недостаточности и отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Внутригодовое распределение стока и факторы его определяющие. Методы расчета внутригодового распределения стока при наличии данных наблюдений. Определение внутригодового распределения стока зря отсутствии данных наблюдений.

**Максимальный сток рек.** Факторы формирования половодья и дождевых паводков. Влияние на максимальный сток площади водосбора, озерности, заболоченности, залесенности, рельефа, почв, агротехнических мероприятий.

Расчетные максимальные расходы воды. Ежегодная вероятность превышения расчетных максимальных расходов воды в зависимости от класса сооружения.

Определение максимальных расходов талых вод при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений. Учет исторических максимумов.

Расчет максимальных расходов дождевых паводков. Расчетные характеристики дождей. Редукционные формулы. Формула предельной интенсивности.

Расчетные гидрографы стока половодья и дождевых паводков.

**Минимальный сток рек.** Физико-географические факторы и условия формирования минимального стока. Определение минимальных расчетных расходов воды при наличии гидрометрических наблюдений. Расчет

минимального стока больших и средних рек при отсутствии данных наблюдений. Минимальные расходы малых рек.

### **Регулирование речного стока**

**Задачи и виды регулирования стока.** Распределение речного стока во времени и по территории. Водопользователи и водопотребители. Требования различных отраслей народного хозяйства на воду. Необходимость регулирования стока. Понятие о водохозяйственном балансе.

Классификация видов регулирования стока: по назначению, продолжительности, степени использования стока и др.

**Водохранилища. Общая методика их расчета.** Назначение и классификация водохранилищ. Нормативные уровни и составляющие объема водохранилища.

Мертвый объем, его назначение, расчет. Полезный объем и нормальный подпорный уровень. Объем форсировки и форсированный подпорный уровень. Нормативные уровни в нижнем бьефе водохранилища и санитарные расходы. Батиграфические характеристики водохранилища.

Состав и порядок водохозяйственного расчета водохранилища. Полезная (плановая) и полная отдача воды из водохранилища. Расчетная обеспеченность отдачи. Типы задач при расчетах регулирования стока. Варианты правил регулирования (наполнения и сработки) водохранилища при эксплуатации, их достоинства, недостатки, условия применения. Балансовые и обобщенные методы расчета регулирования стока их достоинства и недостатки.

**Заиление водохранилищ.** Факторы, определяющие заиление водохранилищ. Отложение наносов по длине водохранилища. Переформирование берегов водохранилища.

Методика расчета объема и сроков заиления. Приближенные методы расчета заиления. Мероприятия по уменьшению заиления водохранилищ.

**Потери воды из водохранилища.** Потери воды на испарение с зоны затопления и подтопления. Методика учета потерь воды на дополнительное испарение.

Потери воды на фильтрацию. Приближенный учет фильтрационных потерь воды при различных гидрогеологических условиях.

Потери воды при зимней сработке водохранилища.

Мероприятия по уменьшению потерь воды.

**Сезонное (годовое) регулирование стока.** Сущность, необходимость и возможность сезонного (годового) регулирования стока. Расчет сезонного регулирования стока таблично-цифровым балансовым методом. Учет потерь воды. Интегральные (суммарные) календарные кривые стока и отдачи и их использование при расчетах сезонного регулирования стока.

**Многолетнее регулирование стока.** Сущность и необходимость многолетнего регулирования стока. Полезная емкость водохранилища многолетнего регулирования стока и ее составляющие. Расчет многолетней и сезонной составляющих объема водохранилища многолетнего регулирования стока балансовым способом по календарным рядам гидрометрических наблюдений. Определение многолетней составляющей объема обобщенным методом сложения кривых обеспеченности. Применение моделированных рядов стока при водохозяйственных расчетах водохранилищ.

**Компенсирующее и каскадное регулирование стока.** Компенсирующее регулирование и условия его применения.

Каскадное регулирование стока и особенности работы водохранилищ в каскаде.

**Регулирование стока паводий и паводков.** Трансформация паводочного и паводного стока водохранилищем. Общая методика ее расчета. Уравнение баланса воды в водохранилище и приемы его решения. Приближенные способы расчета трансформации максимальных расходов водохранилищем.

**Эксплуатация водохранилищ.** Служба эксплуатации водохранилища, ее задачи. Основные правила использования водных ресурсов водохранилища.

Гидрометеорологическое и гидрометрическое обеспеченно службы эксплуатации водохранилищ. Охрана водных ресурсов водохранилища от загрязнения.

**Водохранилища и окружающая природная среда.** Воздействие водохранилищ на окружающую природную среду: климат, фауну, флору, гидрологический и гидрохимический режим поверхностных и подземных вод. Затопление и подтопление земель. Влияние регулирования стока на русловые процессы, формирование берегов, хозяйственную деятельность в зоне водохранилища, условия судоходства, рыбное хозяйство.

Экономическая оценка мероприятий по регулированию стока.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

(для дневной формы обучения)

№ п/п	Название раздела, темы	Количество аудиторных часов					Количество часов УСР	Форма контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Иное		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Введение. Содержание, цели и задачи курса. Краткая история развития гидрологических наук. круговорот воды в природе. Гидрография рек.	2	2		2			
2.	Уровни воды. Водомерные посты, их устройство и оборудование. Обработка данных водомерных наблюдений. Глубина воды. Приборы для измерения глубин. Производство измерений глубин. Скорости течения.	2	2		2			
3.	Расходы воды. Классификация способов определения расходов воды. Вычисление расходов воды по измеренным скоростям и глубинам. Зависимость уровней воды от расходов воды. Однозначная и неоднозначная зависимость уровней от расходов воды. Кривые расхода при наличии ледовых явлений, водной растительности. Экстраполяция кривых расходов.	2	2		2			
4.	Физико-географические факторы стока. Среднее многолетнее значение годового стока. Учет цикличности колебания стока. Расчет годового стока при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений.	2	2		2			
5.	Применение методов математической статистики в гидрологических расчетах. Кривые распределения и обеспеченности. Определение параметров кривых распределения, метод корреляции. Изменчивость годового стока и методы ее определения при наличии, недостаточности и отсутствии данных наблюдений.	2	2		2			
6.	Основные типы внутригодового распределения стока рек. Внутригодовое распределение стока.	2	2		2			

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7.	Расчет максимальных расходов воды весеннего половодья при наличии и отсутствии данных наблюдений. Максимальные расходы дождевых паводков.	2	2		2			
8.	Климатические факторы стока. Влажность воздуха. Дефицит влажности воздуха. Испарение с поверхности воды. Осадки. Уравнение водного и теплового балансов.	2	2		2			
9.	Расчеты максимальных уровней. Минимальные расходы воды. Речные наносы, их образование. Мутность воды. Сток наносов. Селевые потоки.	2	2		2			
10.	Режим рек. Колебания уровней воды в реках и их причины. Зимний режим рек. Режим озер и болот. Влияние озер на речной сток. Болота, их влияния на речной сток.	2	2		2			
11.	Задачи и виды регулирования стока. Классификация видов регулирования стока	2	2		2			
12.	Водохранилища. Назначения водохранилищ, их классификация. Нормативные (характерные) уровни и емкости.	2	2		2			
13.	Потери воды из водохранилища. Заиление водохранилищ. Мероприятия по уменьшению потерь воды и уменьшению объемов заиления.	2	2		2			
14.	Общая методика расчета водохранилищ (расчета регулирования). Прямая и обратная задачи. Сезонно-годовое регулирование стока. Таблично - цифровые (балансовые) методы расчета.	2	2		2			
15.	Многолетнее регулирование стока. Условие перехода от сезонно-годового к многолетнему регулированию стока. Методы расчета многолетней составляющей емкости водохранилища. Определение сезонной емкости водохранилища многолетнего регулирования.	4	4		4			
16.	Задачи регулирования паводочного стока. Основное уравнение трансформации паводка водохранилищем и методика его решения. Упрощенные методы расчета трансформации паводка водохранилищем. Компенсирующее и каскадное регулирование стока. Эксплуатация водохранилищ. Водохранилище и окружающая природная среда.	2	2		2			
	<b>Всего:</b>	<b>34</b>	<b>34</b>		<b>34</b>			<b>ЭКЗАМ</b>

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Примерный перечень лабораторных занятий

1. Определение гидрографических характеристик реки, речной системы и речного бассейна. Изучение гидрометеорологических приборов.
2. Приборы и методы обработки материалов измерения глубин воды.
3. Приборы для измерения скоростей течения воды, их устройство, способы градуировки и применение; вычисление средней на вертикали скорости.
4. Приборы для измерения расходов наносов.
5. Обработка измеренных уровней воды.
6. Вычисление расходов воды.
7. Кривые расходов, площадей живых сечений и средних скоростей; их построение, экстраполяция, применение для определения ежедневных расходов воды и стока.

### Примерный перечень практических занятий

1. Расчёт нормы годового стока по многолетнему ряду наблюдений. Определение нормы годового стока при недостаточности и отсутствии данных наблюдений.
2. Построение аналитической и эмпирической кривых обеспеченности годового стока.
3. Расчет внутригодового распределения стока. Определение расчетных максимальных расходов воды. Построение расчетных гидрографов половодий и паводков.
4. Построение батиграфических кривых водохранилища.
5. Определение мертвого объема водохранилища.
6. Расчет потерь воды из водохранилища на испарение и фильтрацию.
7. Таблично-цифровой расчет водохранилища по календарным рядам стока.
8. Расчеты водохранилищ многолетнего регулирования обобщенными методами.
9. Расчет трансформации паводка при регулировании стока.

### Основная литература

1. Железняков, Г.В. Гидрология, гидрометрия, регулирование стока: учебник / Г.В. Железняков, Т.Д. Неговская, Е.Е. Овчаров. – М. : Колос, 1984. – 432 с.
2. Иванов, А.И. Гидрология и регулирование стока / А.И. Иванов, Г.А. Неговская. – М. : Колос, 1979. – 384 с.
3. Базыленко, Г.М. Гидрологические расчеты / Г.М. Базыленко. – Минск : НПО «ПИОН», 2002. – 143 с.
4. Михайлов, В.Н. Гидрология / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов. – М. : Высшая школа, 2007. – 463 с.

[Вернуться в оглавление](#)