

В.Г. Орлов. А.В. Сикан



ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ

Министерство образования Российской Федерации
Российский государственный гидрометеорологический университет

В. Г. Орлов. А. В. Сикан

ОСНОВЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ

Под редакцией проф. А.М. Владимирова

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области гидрометеорологии
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Экология и природопользование»
и специальности "Геоэкология".*



Санкт-Петербург
2003

УДК 556(073)

Орлов В.Г. Сикан А.В. Основы инженерной гидрологии. Учебное пособие. Направление «Экология и природопользование». Специальность «Геоэкология». – СПб.: изд. РГГМУ. 2003. – 187 с.

Orlov, V.G., Sikan, F.V. Fundamentals of Engineering Hidrology. A manual. Direction «Ecology and Nature Management». Specialization «Geoeccology». – St. Petersburg: RSHU Publishers 2003. – 187 pp.

Рецензенты: д-р геогр. наук, проф. В. В. Дмитриев (Санкт-Петербургский государственный университет), д-р техн. наук, проф. А.В. Рождественский (Государственный гидрологический институт)

Рассматриваются закономерности водного режима рек, озер и водохранилищ. Анализируются задачи прикладной гидрологии, возникающие при проведении мероприятий по рациональному использованию и охране водных ресурсов. Излагаются методы решения этих задач.

Книга предназначена для студентов экологических и гидрометеорологических специальностей и специалистов, связанных по роду своей деятельности с оценкой гидрологических процессов и явлений.

The book considers law-governed nature of water regime of rivers, lakes and storage reservoirs. Authors carry on an analysis of applied hydrology's objectives concerned with rational management and protection of water resources and suggest some techniques of solving these problems.

The book is intended for students of ecological and hydrological professional lines and experts working in the field of estimating of hydrological processes and phenomena.

ISBN 5 – 86813 – 050 – 2



© В.Г. Орлов, 2003

© А.В. Сикан, 2003

© Российский государственный
гидрометеорологический университет
(РГГМУ), 2003

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы инженерной гидрологии» является заключительной при изучении гидрологического цикла в учебном плане подготовки специалистов по направлению «Экология и природопользование» и специальности «Геоэкология».

Изучению дисциплины «Основы инженерной гидрологии» предшествует изучение таких дисциплин, как «Учение о гидросфере», «Учение об атмосфере», «Методы обработки и анализа геоэкологической информации», «Методы и средства гидрометеорологических наблюдений», из которых студенты получают основное представление о гидрологии, ее направлениях, объектах исследований, методах наблюдений и обработки информации.

Курс «Основы инженерной гидрологии» является существенным дополнением к «Учению о гидросфере» в части решения прикладных задач, которые рассматриваются в разделах «Гидрологические расчеты», «Гидрологические прогнозы», «Основы управления гидрологическими процессами».

Полученные знания позволят специалисту-экологу решать инженерные гидрологические задачи в области использования и охраны водных ресурсов.

В процессе изучения дисциплины «Основы инженерной гидрологии» студенты закрепляют навыки работы со справочной гидрометеорологической литературой и нормативными документами в различных сферах гидрологии и водного хозяйства.

В основу настоящего курса легли лекции, читаемые авторами в течение ряда лет в Российском государственном гидрометеорологическом университете студентам не гидрологических специальностей.

Материал для раздела «Гидрологические прогнозы» подготовлен канд. геогр. наук. доц. Ю.М. Георгиевским, а для раздела «Основы управления гидрологическими процессами» – д-ром техн. наук. проф. Г.С. Арсеньевым.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам за просмотр рукописи и высказанные замечания.

Книга ориентирована на студентов-экологов, изучающих дисциплину «Основы инженерной гидрологии». Вместе с тем она может быть полезной специалистам экологам, специалистам гидрометеорологического профиля и МЧС, связанных по роду своей деятельности с оценкой гидрологических процессов и явлений.

1. ОСНОВЫ ГИДРОЛОГИИ СУШИ И ГИДРОМЕТРИИ

1.1. Общие сведения

Изучением рек и других водных объектов, расположенных на материках и островах, занимается наука *гидрология суши* или просто *гидрология*.

В зависимости от круга изучаемых вопросов и методов исследований из гидрологии выделились самостоятельные разделы: гидрометрия, гидрография, гидрологические расчеты и прогнозы.

В *гидрометрии* изучаются методы наблюдений за режимом водных объектов, измерительные устройства и приборы применяемые при этом, а также способы обработки результатов измерений.

В задачу *гидрографии* входит изучение закономерностей географического распространения поверхностных вод, описание конкретных водных объектов, их гидрологического режима и хозяйственного значения, а также установление их взаимосвязи с географическими условиями территории.

Гидрологические расчеты и прогнозы, называемые инженерной гидрологией, занимаются разработкой методов расчета и прогноза различных гидрологических характеристик, необходимых для целесообразного использования или изменения естественного режима водных объектов и для проектирования на них гидротехнических сооружений.

При изучении взаимосвязей водных объектов с окружающей средой гидрология использует данные климатологии, метеорологии, геологии, гидрогеологии, геоморфологии, физической географии.

1.1.1. Краткие сведения из истории гидрологии

В глубокой древности жизнь человека вблизи воды, особенно, если эта вода использовалась для орошения полей, во мно-

гом зависела от режима водных объектов. Человек вынужден был следить за этим режимом, вести наблюдения. К числу самых ранних относятся гидрологические наблюдения древних египтян за колебаниями уровня воды на р. Нил с помощью «ниломеров» – первых гидрометрических устройств. Египтяне знали, что урожай будет очень высоким, если Нил поднимется на 14 локтей (6.2 м), если же он поднимется только на 8 локтей (3.6 м), то наступит голод. Чтобы избежать голода древние египтяне освоили искусство строительства каналов и запруд. И в период правления Петрония (I в. н. э.), когда ниломер показал только 12 локтей, урожай был максимальным, а когда уровень поднялся лишь на 8 локтей, то голода все же не было.

Можно предположить, что начало развитию знаний о воде заложили древние натурфилософы, впервые попытавшиеся дать ответ на, казалось бы, простой вопрос: «Почему текут реки и вода в них не иссякает?».

Древнегреческий философ Фалес Милетский (624 – 547 гг.) предполагал, что морская вода под воздействием ветров проникает в земные недра и затем под воздействием земной тверди восходит вверх и питает реки.

Задумывались о происхождении рек и источников греческие философы Платон (427 – 347 гг.) и Аристотель (384 – 322 гг.). Платон впервые высказал мысль о круговороте воды, а Аристотель впервые предположил, что вода испаряется с поверхности океанов и морей, конденсируется и выпадает на сушу в виде осадков. Однако Аристотель считал, что это не основной источник питания рек. По его теории, в холодных земных пустотах вода конденсируется из воздуха.

Вклад в развитие гидрологических знаний внесли и древнеримские мыслители. Витрувий интересовался поиском грунтовых вод, Герон Александрийский первый предположил, что расход воды равен произведению площади поперечного сечения потока на скорость течения. О познаниях древних римлян в гидрологии и гидротехнике свидетельствуют акведуки – водопроводы Рима – удивительное сооружение древности.

Хотя с течением времени проходило накопление гидрологических знаний, еще многие столетия сохранялось представление о том, что в толще земли соленые морские воды превращаются в пресные и изливаются в виде рек. Эту теорию поддерживали Декарт и Леонардо да Винчи.

Настоящий прорыв произошел в 1674 г., который и считается годом рождения инженерной гидрологии. В этом году француз Пьер Перро (брат известного сказочника) измерил водный баланс р. Сены и доказал, что количество осадков, выпавших на поверхность ее бассейна, превышает объем стока.

В XVIII в. итог двухтысячелетним исследованиям подвел Ж. Бюффон в работе «Всеобщая и частная естественная история», где впервые научно сформулирована идея круговорота, включая все его фазы.

Более или менее систематические исследования водных объектов в России были начаты при Петре I. Он был организатором первых специальных гидрографических обследований рек, создателем первого закона об охране вод, по его приказу в 1715 г. был устроен первый водомерный пост в России на р. Неве у Петропавловской крепости.

1.1.2. Круговорот воды на земном шаре

Общие запасы воды на Земле (не считая физически и химически связанную воду) составляют около 1386 млн. км³, из них 96.5% приходится на воды Мирового океана.

Суммарные запасы пресных вод на земном шаре оцениваются в 35 млн. км³, что составляет всего 2.3% общего объема воды на Земле. Из них более 68% содержатся во льдах Антарктиды и Гренландии и 30% – в подземных водах и только 0.3% – в озерах, реках и болотах.

На земном шаре непрерывно происходит круговорот воды (влагооборот), который, взаимодействуя с атмосферой, литосферой и биосферой, связывает в единое целое все части гидросферы, т. е. океан, воды атмосферы, реки, озера, подземные

воды, ледники и т. д. Движущими силами его являются тепловая энергия и сила тяжести. Под воздействием тепловых процессов происходит испарение, конденсация водяных паров, таяние, замерзание и другие фазовые переходы. Под влиянием силы тяжести происходит выпадение атмосферных осадков, движение поверхностных и подземных вод и т. д.

Земля как планета, в сущности, является гигантской паровой машиной, двигателем которой служит солнечная энергия. Вода, испаряющаяся под действием солнечной энергии с поверхности Мирового океана, поступает в атмосферу и затем вновь возвращается в океан в виде атмосферных осадков, но не вся. Осадков на поверхность океана выпадает меньше, чем испаряется. Часть испарившейся воды воздушными течениями переносится с океана на сушу и там, выпадая в виде осадков, является основным источником формирования вод суши. Часть атмосферных осадков, выпадающих над сушей, не успевшая испариться или просочиться вглубь, вновь возвращается в океан реками в виде так называемого речного стока.

Как показали исследования, в ежегодном круговороте на Земле участвует $577\,000\text{ км}^3$ воды:

Испарение с поверхности океана, $E_{\text{ок}}$...	505 000	$\text{км}^3/\text{год}$
Испарение с поверхности суши, $E_{\text{с}}$	72 000	$\text{км}^3/\text{год}$
Осадки на поверхность океана, $P_{\text{ок}}$	458 000	$\text{км}^3/\text{год}$
Осадки на поверхность суши, $P_{\text{с}}$	119 000	$\text{км}^3/\text{год}$

Исходя из этих цифр, можно записать уравнение водного баланса для земного шара

$$E_{\text{ок}} + E_{\text{с}} = P_{\text{ок}} + P_{\text{с}}. \quad (1.1)$$

Из выражения (1.1) видно, что Земля является замкнутой системой, поскольку суммарное испарение с ее поверхности равно суммарным осадкам.

Разность испарения с поверхности океана и осадков, т. е.

$$h = E_{\text{ок}} - P_{\text{ок}} = 505\,000 - 458\,000 = 47\,000 \text{ км}^3/\text{год},$$

представляет собой тот источник воды, который питает ежегодно все воды суши – реки, озера, подземные воды, ледники. Океан, таким образом, как гигантский естественный испаритель является основным поставщиком пресной воды на континенты. Принимая речные воды, океан не только возобновляет их количественно, но и восстанавливает их качественно. И если бы человек вдруг прекратил сбрасывать в реки сточные воды, вода в реках со временем вновь стала бы первоначально чистой.

1.2. Водосбор водного объекта

Каждый водный объект на поверхности суши имеет свою область питания, или *водосбор*, представляющий собой часть земной поверхности и толщу почв и горных пород, откуда вода поступает к водному объекту (рис.1.1).

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

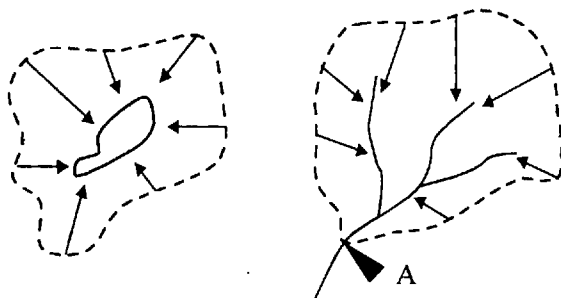


Рис.1.1. Водосборы бессточного озера и реки для створа А

Поверхностные и подземные водосборы не всегда совпадают, особенно у малых рек. Однако в гидрологических расчетах за площадь водосбора часто принимают размер только поверхностного водосбора из-за отсутствия необходимых данных для определения подземного.

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

Главный водораздел земного шара разделяет всю поверхность Земли на два склона Атлантико-Ледовитый и Тихоокеанско-Индийский, по которым воды суши стекают в мировой океан. Однако непосредственно в океан впадают, как правило, только наиболее крупные реки, водосборные бассейны которых могут включать десятки и сотни средних и мелких рек.

Водоразделы, отделяющие части суши, сток с которых происходит в те или иные речные системы, называют водоразделами речных бассейнов.

Хотя большая часть поверхности суши (78%) имеет общий уклон по направлению к морям и океанам, 22% суши приходится на области внутреннего стока, где уклон направлен внутрь материков, в замкнутые котловины, часто к крупным бессточным озерам. Наиболее значительные из таких областей – Арало-Каспийский бассейн, бассейн озера Чад в Африке, Большой бассейн в Северной Америке, многие районы Центральной Азии. В этих районах средняя многолетняя величина испарения равна средней многолетней величине осадков, но такие системы все равно нельзя считать замкнутыми, так как происходит постоянный влагообмен через атмосферу.

Водоразделы между периферийными и замкнутыми частями суши носят название внутренних водоразделов.

1.3. Основные морфометрические характеристики речного водосбора

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

Площадь водосбора (F) является одной из основных характеристик. Для ее определения на карте проводят линию водораздела и измеряют ограниченную ей площадь планиметром, а при ориентировочных расчетах – палеткой.

Длина водосбора (L) измеряется по карте как расстояние по прямой от устья реки (или от замыкающего створа) до самой удаленной точки водосбора (рис.1.2.). В случае изогнутости бассейна прямая (AD) заменяется ломаной (ACE), каждый отрезок которой повторяет главные изгибы русла.

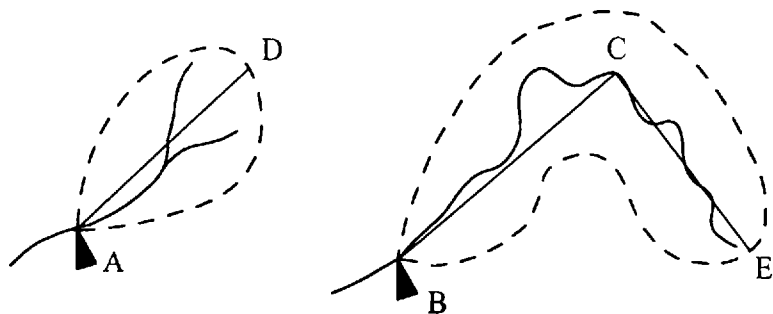


Рис. 1.2. Определение длины водосбора (L) при обычной (А) и изогнутой форме водосбора (В)

Средняя ширина водосбора ($B_{\text{ср}}$) определяется делением площади водосбора F на его длину L :

$$B_{\text{ср}} = F/L. \quad (1.2)$$

Средняя высота водосбора (относительно уровня моря) является одной из важнейших морфометрических характеристик, особенно в горных районах, так как она в неявном виде характеризует основные составляющие водного баланса, а также другие характеристики водного режима. Для определения средней высоты водосбора используется карта, на которую нанесены изолинии высот местности (*горизонтالي*). Вначале строится график распределения площадей водосбора по высотным зонам, а затем находится ее средняя высота.

Коэффициенты залесенности $f_{\text{л}}$, заболоченности $f_{\text{б}}$ и озерности $f_{\text{оз}}$ используются довольно часто, так как леса, озера и болота могут оказывать существенное влияние на режим реки. Указанные коэффициенты характеризуют процентную долю площади лесов, болот и озер от общей площади водосбора F :

$$f_{\text{л}} = \frac{F_{\text{л}}}{F} 100\%, \quad f_{\text{б}} = \frac{F_{\text{б}}}{F} 100\%, \quad f_{\text{оз}} = \frac{F_{\text{оз}}}{F} 100\%, \quad (1.3)$$

где $F_{\text{л}}$, $F_{\text{б}}$, $F_{\text{оз}}$ — соответственно площади занятые лесами, болотами и озерами.

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

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

$$i_{\text{в}} = [0.5(l_0 + l_n) + l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1}] \Delta H / F, \quad (1.4)$$

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

Анализируя формулу (1.4), можно отметить, что основной вклад в величину i_v вносят уклоны речных склонов, так как на них приходится основная доля площади водосбора, влияние же уклона речного русла сказывается в гораздо меньшей степени.

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

1.4. Уравнение водного баланса речного бассейна

В соответствии с законом сохранения вещества уравнение водного баланса для речного бассейна и произвольного интервала времени Δt можно записать в виде

$$P + Z = h + W + E \pm \Delta U, \quad (1.5)$$

где *приходная часть*: P – атмосферные осадки на поверхность речного бассейна; Z – конденсация водяного пара; *расходная часть*: h – поверхностный сток; W – подземный сток (для малых рек); E – суммарное испарение с бассейна; *изменение запасов воды на бассейне*: ΔU .

Обычно водный баланс рассчитывается за годовой интервал времени, при этом знак ΔU меняется в зависимости от степени увлажненности года; в засушливые годы часть запасов подземных вод расходуется на сток ($-\Delta U$), а во влажные, наоборот, часть осадков пойдет на увеличение запасов подземных вод ($+\Delta U$). Для многолетнего периода, включающего в себя засушливые и влажные годы, значение ΔU для средних и крупных рек стремиться к нулю и уравнение водного баланса примет вид

$$P_0 = h_0 + E_0, \quad (1.6)$$

где P_0 , h_0 , E_0 – средние многолетние значения осадков, стока и испарения.

1.5. Исток и устье реки

Истоком – называется место на земной поверхности, где русло реки приобретает отчетливо выраженные очертания и где в нём наблюдается течение.

Реки могут брать начало из болот, родников, озёр, ледников. Если река образуется от слияния двух меньших рек, то место их слияния является началом этой реки, однако за её исток следует принимать исток более длинной из двух слившихся рек. В этом случае длина реки носит название гидрографической.

Иногда из одного и того же водоема вытекают ручьи и речки, принадлежащие разным речным системам. Например, из Пинских болот, с одной стороны, вытекают притоки Днепра, а с другой – притоки Вислы.

Следует отметить, что у некоторых рек местоположение истока может меняться, поэтому положение того или иного пункта на реке даётся не по расстоянию от истока, а по расстоянию от устья.

Место, где река впадает в другую реку, озеро или море, называется *устьем* реки. В засушливых районах реки могут заканчиваться «слепыми устьями». *Слепым устьем* называется участок реки, где она теряется в результате потерь воды на испарение, просачивание в почвогрунты, а также, если вода разбирается на орошение.

1.6. Река и речная сеть

Дождевые и талые воды, стекая по углублениям земной поверхности в направлении уклона, образуют *водотоки*. Различают постоянные и временные водотоки. Постоянным называется водоток, движение воды в котором происходит в течение всего

года. Соответственно временный – это водоток, движение воды в котором происходит лишь часть года.

Водотоки бывают различных размеров. *Водоток значительных размеров, питающийся стоком атмосферных осадков со своего водосбора и имеющий четко выраженное русло, называется рекой.* В свою очередь реки подразделяются на большие, средние и малые в зависимости от размеров их водосборов.

Большая река – река, бассейн которой обычно располагается в нескольких географических зонах и гидрологический режим которой в целом не свойственен рекам каждой географической зоны в отдельности. К категории больших рек относятся реки, имеющие площадь водосбора более 50000 – 75000 км².

Средняя река обычно имеет бассейн в пределах одной географической зоны. Гидрологический режим средней реки характерен для большинства рек этой зоны, т. е. носит *зональный характер*. К категории средних относятся реки, имеющие бассейн площадью от 1000 – 2000 до 50000 – 75000 км².

Малая река (площадь водосбора меньше 1000 – 2000 км²) также имеет бассейн, расположенный в пределах одной географической зоны, но ее гидрологический режим под влиянием местных условий может существенно отличаться от режима, свойственного большинству рек данной географической зоны (*азональность*). Малые реки, в отличие от средних и больших рек, могут не полностью дренировать грунтовые воды, что также определяет отличие их режима от режима, свойственного более крупным рекам данной географической зоны. Самые малые водотоки с площадью водосбора менее 50 км² называют ручьями.

По условиям протекания реки подразделяются на *равнинные, полугорные и горные*. Для этой классификации в качестве критерия используется безразмерное число Фруда:

$$Fr = V^2/gh, \quad (1.7)$$

где V – скорость течения реки (м/с); h – глубина потока (м);

g – ускорение свободного падения (м/с^2). Критическое значение числа Фруда равно единице. Если число Фруда больше единицы, то поток находится в бурном состоянии, если меньше единицы – спокойный.

Равнинные реки $Fr \leq 0.1$.

Полугорные реки ... $0.1 < Fr \leq 1.0$.

Горные реки $Fr > 1.0$.

Совокупность постоянных и временных водотоков, озер, водохранилищ, болот и родников составляют *гидрографическую сеть* бассейна реки.

Совокупность естественных и искусственных водотоков называют *русловой сетью*.

Речная сеть представляет собой часть русловой сети, состоящей из отчетливо выраженных русел постоянных водотоков.

Речная система – включает в себя главную реку и большое количество водотоков, которые либо непосредственно впадают в главную реку, либо несут в неё свои воды через сеть притоков. На карте речная система напоминает ветвистое дерево, где стволом является главная река, а ветвями – многочисленные притоки. В качестве главной реки в разных случаях считают либо наиболее длинную реку в бассейне (Волга длиннее более полноводного притока Камы), либо наиболее многоводную реку (Миссисипи при слиянии с более длинной Миссури).

Длина реки L – это расстояние вдоль русла от истока до устья (или замыкающего створа). Длины рек обычно определяются по крупномасштабным картам или аэрофотоснимкам (расстояние измеряется по геометрической оси русла или по фарватеру). При определении длины рек по мелкомасштабным картам должны вводиться поправки на масштаб и извилистость русла: чем мельче масштаб карты и больше извилистость реки, тем больше ошибки при расчетах длин рек.

В табл.1.1. приводится количество водотоков различной длины на территории бывшего СССР.

Таблица 1.1

**Количество водотоков различной длины
на территории бывшего СССР по данным ГГИ**

Категория водотоков	Длина, км	Количество		Суммарная длина	
		число	%	км	%
Самые малые	менее 10	2 812 587	95.0	5 624 881	58.3
Малые	10 – 25	113 974	3.8	1 697 939	17.6
	26 – 100	32 733	1.1	1 426 288	14.8
Средние	101 – 500	3 844	0.1	669 861	6.9
Большие	более 500	260	< 0.01	228 895	2.4
Всего		2 963 398	100	9 647 864	100

Коэффициентом извилистости реки на данном участке называется отношение длины реки в пределах этого участка (L_i) к длине прямой, соединяющей концы этого участка (l_i):

$$K_{\text{изв}} = L_i / l_i . \quad (1.8)$$

Сумма длин всех рек в пределах бассейна или какой-либо территории даёт *протяжённость речной сети* $\sum L_i$. Отношение протяжённости речной сети к площади бассейна характеризует *густоту речной сети* бассейна или территории ($\text{км}/\text{км}^2$):

$$d = \sum L_i / F . \quad (1.9)$$

В табл.1.2 даны значения коэффициента d для различных ландшафтных зон Европейской территории России.

Таблица 1.2

**Густота речной сети
в пределах Европейской территории России**

Ландшафтная зона	Средняя густота речной сети
Тундра	0.51
Лесная	0.57
Лесостепная	0.38
Степная	0.27
Полупустынная	0.23

1.7. Речная долина и русло реки

Реки обычно текут в узких вытянутых понижениях рельефа, которые называются *речными долинами*. Элементами речной долины являются (рис.1.3): 1 – дно (ложе) долины; 2 – тальвег; 3 – русло реки; 4 – пойма; 5 – склоны долины; 6 – террасы; 7 – бровка; 8 – подошва склона.

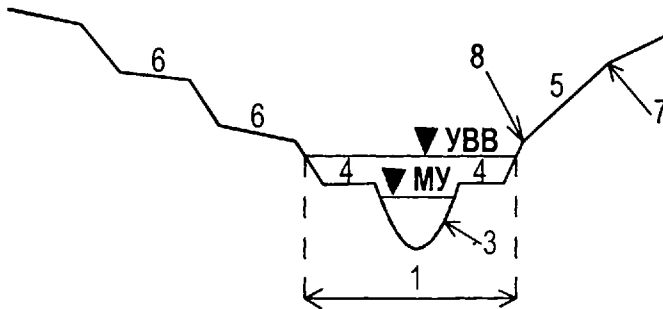


Рис.1.3. Схема поперечного профиля речной долины;
УВВ – уровень высоких вод; МУ – меженный уровень

- *Дно*, или *ложе* – это наиболее пониженная часть долины (1).
- Повышенные участки суши, ограничивающие с боков дно долины, называются *склонами* (5).
- Места сопряжения дна долины со склонами имеют более или менее заметный излом на поперечном профиле и называются *подошвой склонов* (8).
- Полоса сопряжения склонов долины с прилегающей местностью называется *бровкой* долины (7).
- *Террасами* называются относительно горизонтальные площадки, которые располагаются уступами по высоте в пределах дна и склонов долины (6).
- Терраса, расположенная в пределах дна долины и периодически заливаемая речными водами во время половодья или паводков, называется пойменной террасой или просто *поймой* (4). Горные реки, не имеющие развитой долины и протекающие в узких расщелинах гор, могут не иметь поймы. На равнинных реках ширина поймы может быть весьма значительной. Так, максимальная ширина поймы в нижнем течении Волги достигает 60 км, а в нижнем течении Оби – более 100 км. Размеры речной поймы играют существенную роль в формировании режима уровней и расходов реки. В период половодий и паводков поймы задерживают большое количество воды и затем отдают её при понижении уровня, являясь, таким образом, естественным регулятором водного режима реки.
- Эрозионный врез, образованный речным потоком и проходящий по дну долины в продольном направлении, называется *руслом реки* (3). Размеры и форма русла сильно меняются по длине реки в зависимости от ее водности, строения долины, характера пород, слагающих русло.
- Линия, соединяющая самые глубокие точки речной долины, называется *тальвегом*, который обычно совпадает с линией фарватера речного русла.

1.7.1. Типы речных долин

Речные долины образуются в результате эрозионной деятельности рек. В ряде случаев в происхождении и развитии речных долин существенное участие принимали тектонические, вулканические, ледниковые и другие факторы.

По характеру поперечного профиля выделяют следующие типы долин.

Щели – глубокие и узкие долины с отвесными иногда нависающими склонами из плотных большей частью скальных пород. Дно долины занято на всю ширину руслом реки. Такой тип долин встречается в горных районах с трудно размываемыми породами.

Каньоны – глубокие и узкие долины с крутыми склонами. Каньоны имеют сравнительно узкое дно, занятое на всю ширину руслом реки. Они свойственны известковым или базальтовым плато, расположенным в районах аридного (засушливого) климата, например каньоны р. Колорадо в Северной Америке, р. Пяньж в Таджикистане.

Ущелья – глубокие большей частью скалистые долины с выпуклыми склонами, книзу приобретающими значительную крутизну. Ущелья встречаются в горных районах, где они достигают 1500 – 1800 м глубины. Дно их узкое, но, в отличие от щелей и каньонов, не полностью занято руслом реки.

Корытообразные (трог) – широкие долины, имеющие в поперечном сечении U-образную форму или форму корыта с крутыми склонами и с широким вогнутым дном. Переход от крутых склонов к вогнутому дну совершенно плавный. Корытообразная форма возникает в горных долинах, бывших сначала эрозионными, а затем подвергшихся переработке в результате движения древнего или современного ледника.

Трапецевидные – широкие долины с прямыми или выпуклыми склонами. Разновидностью этого типа является *яшикообразная* долина с широким и плоским дном и крутыми склонами. Это наиболее распространенная форма долин равнинных рек.

Вади (узбои) – сухие долины временных или периодически пересыхающих водотоков пустынь, заканчивающиеся в бессточных впадинах (Средняя Азия, северная Африка, Аравия и др.). Вади считаются реликтовыми образованиями, т. е. долинами рек, существовавших в более влажную эпоху.

1.8. Продольный профиль реки

Продольный профиль представляет собой линию пересечения дна реки вертикальной плоскостью, проходящей через фарватер. Продольный профиль реки вырабатывается под влиянием большого числа факторов, главными из которых являются степень сопротивляемости пород русла размыву, уклон речной долины и водность реки.

Важнейшими характеристиками продольного профиля являются уклон дна и уклон водной поверхности. Уклон дна или водной поверхности (I) выражается отношением разности отметок в начале h_1 и в конце h_2 заданного участка к расстоянию L между началом и концом участка по линии фарватера, т. е.

$$I = (h_1 - h_2) / L. \quad (1.10)$$

Под *средним уклоном реки* обычно понимают средний уклон водной поверхности в период межени (в период низких уровней). Как правило, средний уклон реки меньше среднего уклона водосбора. Для равнинных рек средний уклон составляет десятые или даже сотые доли промилле. Например, средний уклон Волги равен 0.07 ‰, что соответствует падению уровня 7 см на км длины.

В начальной стадии формирования продольного профиля реки на разных её участках интенсивно идут процессы русловой эрозии как глубинной, так и боковой. Глубинная эрозия представляет собой врезание водотока в вертикальном направлении в толщу грунта. Боковая эрозия ведет лишь к расширению русла или перемещению этого русла в горизонтальном направлении в

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

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

Из большого разнообразия продольных профилей рек можно выделить четыре основных типа (*Рис. 1.4.*):

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

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



Рис. 1.4. Основные типы продольных профилей рек

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

4. *Выпуклый (сбросовый)* – характеризуется пониженными уклонами в верховье и повышенными в низовье реки; встречается редко (в России – реки Карелии и Кольского по-ва).

1.9. Водное сечение

Сечение русла вертикальной плоскостью, перпендикулярной направлению течения, называется *водным сечением* потока (рис. 1.5). Элементами водного сечения являются:

- площадь живого сечения ω ;
- смоченный периметр P , представляющий собой длину линии, ограничивающей смоченную часть водного сечения (кривая abc);
- гидравлический радиус $R = \omega/P$;
- ширина русла B ;
- максимальная глубина $h_{\max}$;
- средняя глубина $h_{\text{ср}} = \omega/B$.

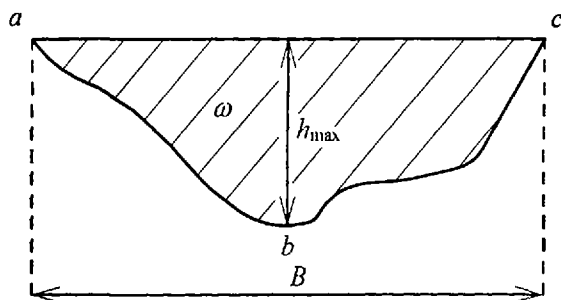


Рис.1.5. Водное сечение потока

Элементы водного сечения не остаются постоянными. Величины их находятся в прямой зависимости от уровня воды в реке.

1.10. Основные характеристики речного стока

Для количественной оценки стока рек применяются следующие характеристики.

Расход воды – это количество воды, протекающее через поперечное сечение потока в единицу времени. Расходы воды (Q) обычно выражаются в $\text{м}^3/\text{с}$, а для малых водотоков – в л/с.

Расход воды можно представить как произведение площади живого сечения потока (ω , м^2) на среднюю скорость течения воды ($V_{\text{ср}}$, м/с):

$$Q = \omega V_{\text{ср}}. \quad (1.11)$$

Расход воды – это мгновенная характеристика потока, однако в течение года расходы на реках существенно изменяются, достигая максимальных значений в период весеннего половодья или дождевых паводков и опускаясь до минимума в период летней или зимней межени. Чтобы оценить водность реки за любой

интервал времени (Δt) рассчитываются средние расходы за интервал. В практике гидрологических расчетов используются среднесуточные, среднемесячные, среднегодовые и др. расходы воды.

Объём стока (W) – количество воды, протекающее в русле реки через замыкающий створ за время T . Обычно объём стока выражается в м^3 или км^3 , а время – в сутках. Объём стока можно выразить через средний расход:

$$W = 86400 Q_{\text{ср}} T [\text{м}^3] = 8.64 \cdot 10^5 Q_{\text{ср}} T [\text{км}^3], \quad (1.12)$$

где $Q_{\text{ср}}$ – средний расход в $\text{м}^3/\text{с}$ за время T суток; 86400 – число секунд в сутках.

Модуль стока (q или M) – количество воды, стекающее с единицы площади за единицу времени, $\text{л}/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$:

$$q = 10^3 (Q/F), \quad (1.13)$$

где F – площадь водосбора в км^2 .

Слой стока (h или Y , мм) за T суток можно получить, если объём стока за T суток равномерно распределить по всей площади водосбора:

$$h = 86.4 \frac{TQ}{F}, \quad (1.14)$$

где T – время в сутках; Q – расход за время T в $\text{м}^3/\text{с}$; F – площадь водосбора в км^2 .

1.11. Источники питания рек

Основной источник питания всех рек на Земле – атмосферные осадки. Часть выпадающих жидких осадков образует поверхностный сток и служит непосредственным источником питания рек в период паводков.

Твердые осадки аккумулируются на поверхности земли в виде снежного покрова. На равнинах и невысоких горах накопившийся за зиму снег тает в тёплое время года и также служит источником питания рек.

Снег, накопившийся в более высоких горах, в отдельные годы стает не весь, пополняя запасы вечных снегов и ледников. Талые воды этих снегов и ледников являются ещё одним источником питания рек.

Некоторая часть талых и дождевых вод идёт на пополнение запасов подземных вод, которые значительно медленнее попадают в русла рек. Подземные воды также являются источником питания рек; они обеспечивают устойчивость речного стока. Таким образом, существует четыре источника питания рек:

- жидкие осадки;
- снежный покров;
- высокогорные снега и ледники;
- подземные воды.

Соотношения между количеством воды, поступающей в реки от того или иного источника питания, меняются в течение года и неодинаковы в различных районах. Режим питания реки зависит главным образом от климатических условий и, прежде всего, от режима осадков и температуры воздуха.

Впервые на решающую роль климата в формировании водного режима реки указал известный русский ученый А. И. Воейков. В своей работе «Климаты земного шара, России в особенности» (1884 г.) он писал: «Реки суть продукт климата их бассейнов». Он же предложил первую климатическую классификацию рек, по которой реки делились на типы в зависимости от преобладания того или иного источника питания.

В настоящее время в России более известна классификация рек по видам питания М. И. Львовича. Для определения степени преобладания того или иного вида питания приняты три градации.

- Если один из видов питания дает более 80% годового стока реки, следует говорить об *исключительном* значении

данного вида питания (например, река имеет исключительно снеговое питание).

- Если на долю какого-то вида питания приходится от 50% до 80% стока, то этому виду питания придается *преимущественное* значение (например, река имеет преимущественно дождевое питание). При этом другие виды питания учитываются лишь, если на их долю приходится больше 10% годового стока.
- Если ни один из видов питания не дает больше 50% годового стока, то такое питание называют *смешанным*.

В годовом стоке рек России преобладает снеговое питание. Преобладание дождевого стока наблюдается только на части рек Забайкалья, Дальнего Востока и Закавказья. Доля грунтовой составляющей в годовом стоке колеблется от 30 – 50 % в лесной зоне России, до 10 % и менее в засушливых районах.

Подземное питание разделяют на два вида:

- почвенно-грунтовое питание (верховодка);
- глубокое грунтовое питание (базисный сток).

Подземное питание первого вида является малоустойчивым и подвержено колебаниям в связи с ходом метеозаэлементов.

1.12. Фазы водного режима

Годовой цикл водного режима реки подразделяется на характерные периоды (*фазы*): половодье, паводки, межень (летне-осенняя и зимняя).

Половодье – фаза водного режима реки, которая ежегодно повторяется в данных климатических условиях и характеризуется значительным повышением водности, высоким и продолжительным подъемом уровня обычно с выходом воды на пойму.

На большинстве рек России половодье вызывается весенним таянием снега (весеннее половодье). В районах с муссонным климатом половодье формируется летом за счет продолжительных и интенсивных муссонных дождей. Летнее половодье может также наблюдаться на некоторых горных реках, имеющих

преимущественно ледниковое питание. На таких реках наиболее интенсивное таяние высокогорных снегов и ледников наблюдается в месяцы с максимальной температурой воздуха.

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.

Наиболее значительные дождевые паводки на большинстве российских рек проходят в летне-осенний период, когда наблюдается наиболее интенсивная циклоническая деятельность и выпадает большое количество жидких осадков. Обычно дождевые максимумы на средних и крупных реках России уступают по высоте максимумам весенних половодий, однако на малых реках, где паводочные пики формируются за счет интенсивных, но относительно коротких ливней, дождевые максимумы нередко оказываются выше снеговых.

Половодья и паводки могут иметь одновершинную или многовершинную форму. Для рек равнинных районов характерно однопиковое весеннее половодье. Появление нескольких пиков на гидрографе весеннего половодья может быть связано либо с возвратом холодов, либо с неравномерным поступлением талых вод с различных частей бассейна. Так, например, двухпиковое весеннее половодье, как правило, наблюдается на р. Каме у г. Перми вследствие неодновременного прохождения весеннего половодья в равнинной и горной частях бассейна. Гидрограф может иметь многовершинную форму и в том случае, если на спад весеннего половодья накладываются дождевые паводки.

Дождевые паводки на реках ЕТР чаще имеют однопиковую форму гидрографа, однако, если паводкоформирующий дождь идет с перерывами или имеет хорошо выраженные скачки интенсивности, то может образоваться многопиковая волна.

Половодья и паводки характеризуются следующими числовыми показателями: дата начала; дата окончания; продолжительность; дата прохождения максимального расхода (или

уровня); величина максимального расхода (или уровня); объем (или слой) стока.

Дату начала половодья или паводка легко определить по гидрографу – момент начала интенсивного увеличения расходов. Значительно сложнее определить дату окончания. Обычно за окончание половодья или паводка принимается дата перехода реки преимущественно на грунтовое питание. Определение этой даты производится путем «расчленения» гидрографа по видам питания.

Межень (меженный период) – это фаза водного режима продолжительностью не менее 10 дней, ежегодно повторяющаяся в одни и те же сезоны и характеризующаяся малой водностью.

Межень обусловлена периодами сухой или морозной погоды, когда водность реки поддерживается главным образом грунтовым питанием при сильном уменьшении или прекращении поверхностного стока. В умеренных и высоких широтах различают *летне-осеннюю межень* и *зимнюю межень*.

В зоне избыточного и достаточного увлажнения, где грунтовые воды залегают неглубоко, даже малые реки (с неглубоким врезом долины) в теплый период года получают устойчивое грунтовое питание. В холодный период года малые реки этой зоны часто промерзают, что связано с истощением запасов грунтовых вод верхних водоносных горизонтов и с быстрым увеличением толщины льда в период отрицательных температур.

На средних и больших реках понижение стока в период зимней межени связано, прежде всего, с сезонным промерзанием почв и грунтов. Поэтому в зоне избыточного и достаточного увлажнения сток рек в зимнюю межень меньше, чем в летнюю.

На реках зоны неустойчивого и недостаточного увлажнения летняя межень более низкая по сравнению с зимней вследствие интенсивного испарения в теплый период года, что приводит к пересыханию малых и даже средних рек.

1.13. Скорости течения воды и их распределение по живому сечению

Скорости течения в реках неодинаковы в различных точках потока: они изменяются и по глубине, и по ширине живого сечения. На каждой отдельно взятой вертикали наименьшие скорости наблюдаются у дна, что связано с влиянием шероховатости русла. От дна к поверхности нарастание скорости сначала происходит быстро, а затем замедляется. В открытых потоках максимум скоростей обычно наблюдается у поверхности или на глубине $0.2h$ (h – глубина на вертикали). Кривые изменения скоростей по вертикали называются *эпюрами скоростей*. (рис. 1.6)

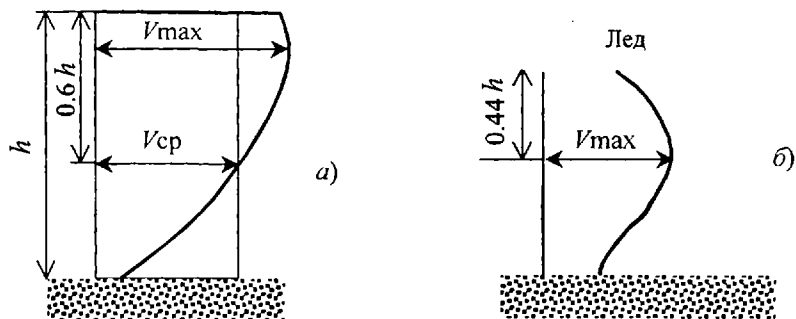


Рис. 1.6. Эпюры скоростей: а – открытое русло; б – при наличии ледяного покрова

На распределение скоростей по вертикали большое влияние оказывают неровности рельефа дна, ледяной покров, ветер и водная растительность. Так, при наличии на дне неровностей и водной растительности скорости в придонном слое заметно снижаются. Зимой подо льдом, особенно при наличии шуги, под влиянием добавочного трения о шероховатую нижнюю поверхность льда, уменьшаются скорости в поверхностном слое, а максимальная скорость смещается к середине потока. Ветер, дующий в направлении течения, увеличивает скорость у поверхности. В противоположном случае скорости у поверхности

уменьшаются, а положение максимума смещается на большую глубину по сравнению с его положением в безветренную погоду.

По ширине потока скорости как поверхностная, так и средняя меняются довольно плавно, в основном повторяя распределение глубин в живом сечении: у берегов скорость меньше, в центре потока она наибольшая.

Линия, проходящая по поверхности реки и соединяющая точки с наибольшими скоростями, называется *стрешнем*.

Наглядное представление о распределении скоростей в живом сечении можно получить проводя *изотахи* – линии, соединяющие точки с равными скоростями (рис 1.7).

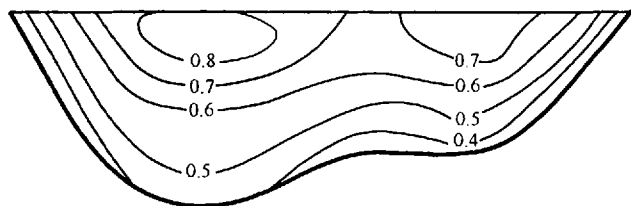


Рис. 1.7. Изотахи в живом сечении речного потока

Средняя скорость на вертикали вычисляется делением площади эпюры на глубину вертикали. Такой метод определения средней скорости называется *графическим* (рис. 1.6, а).

При использовании аналитического способа средняя скорость на вертикали вычисляется по формулам в зависимости от числа точек, на которых производились измерения скоростей вертушкой (точек может быть от одной до шести).

При одноточечных измерениях в качестве $V_{\text{ср}}$ принимается непосредственно результат измерения в точке, где скорость течения близка к средней скорости на вертикали, обычно на глубине $0.6 h$:

$$V_{\text{ср}} = V_{0.6}. \quad (1.15)$$

При двухточечных измерениях на глубинах $0.2h$ и $0.8h$ средняя скорость на вертикали вычисляется по формуле

$$V_{\text{ср}} = 0.50 (V_{0.2} + V_{0.8}), \quad (1.16)$$

т. е. принимаются равные весовые коэффициенты при измеренных скоростях. Исследования показали, что оптимальные коэффициенты 0.5 мало зависят от формы эпюры. Этим объясняется универсальность и широкое распространение формулы (1.16).

При измерениях скоростей в трех и более точках дискретные значения V уже достаточно полно фиксируют конкретную эпюру. Вычисление $V_{\text{ср}}$ при многоточечных измерениях аналитически сводится к задаче приближенного интегрирования.

На основе метода приближенного интегрирования Ньютона-Котеса получены формулы для русла, свободного ото льда и водной растительности:

при измерении в трех точках

$$V_{\text{ср}} = (1/36) (17V_{0.2} + 3V_{0.6} + 16V_{0.8}); \quad (1.17)$$

при измерении в пяти точках

$$V_{\text{ср}} = 0.05V_{\text{п}} + 0.347(V_{0.2} + V_{0.6}) + 0.173V_{0.8} + 0.083V_{\text{д}}. \quad (1.18)$$

Что касается измерения в одной традиционно принимаемой точке ($0.5h$), то скорость в ней не равна средней по вертикали. В этом случае

$$V_{\text{ср}} = KV_{0.5}. \quad (1.19)$$

Переходный коэффициент K должен определяться по данным предшествующих многоточечных измерений. Если они не проводились, можно принимать приближенное значение $K = 0.9$.

1.14. Методы измерения скоростей течения рек

В настоящее время разработано достаточно много методов измерения скорости течения воды, однако наиболее часто скорости течения воды в реках измеряют либо поплавками, либо гидрометрическими вертушками. Поплавки являются простейшими приборами и позволяют определить скорость течения путем деления длины пути l , пройденного поплавком, на время t :

$$V = l/t. \quad (1.20)$$

Поплавки бывают поверхностные – для измерения поверхностной скорости течения и глубинные – для измерения скорости на заданной глубине.

Более точно скорости течения измеряются с помощью гидрометрической вертушки. Гидрометрические вертушки позволяют определять скорости течения в отдельных точках потока. Основными частями любой вертушки являются: корпус, лопастной винт, ось, счетно-контактный механизм и хвост.

Измерение скорости течения вертушкой основано на принципе вращения ее лопасти под действием движущейся воды. Между скоростью течения (V , м/с) и количеством оборотов лопасти вертушки в единицу времени (n , об/с) существует определенная зависимость: $V = f(n)$. Эта зависимость для каждой вертушки определяется с помощью тарировки в специальных бассейнах (т.е. экспериментально) и обычно представляется в виде тарировочной кривой и таблицы к ней.

Вертушка опускается в воду на металлической штанге или тросе. Под действием течения воды лопасти вертушки начинают вращаться. Через 20 оборотов происходит замыкание контактного устройства, которое подает световой или звуковой сигнал. Время между сигналами засекается по секундомеру.

1.15. Методы определения расходов воды

Расход воды в живом сечении может быть определен по формуле (1.11), т. е. $Q = \omega V_{\text{ср}}$. Однако на практике эта формула применяется только в том случае, когда отсутствуют данные наблюдений за скоростями потока, и средняя скорость в живом сечении определяется по формуле Шези:

$$V_{\text{ср}} = C\sqrt{RI}, \quad (1.21)$$

где R – гидравлический радиус, который можно заменить на среднюю глубину в сечении; I – уклон реки на участке реки, где производятся измерения; C – коэффициент Шези.

Коэффициент Шези для каждого створа считается квазиконстантой и может быть определен по одной из эмпирических формул, например, по формуле Манинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (1.22)$$

где n – коэффициент шероховатости, который находится по специальным таблицам (например, М. Ф. Срибного).

При наличии измерений скоростей поплавками или вертушкой на отдельных вертикалях расход воды вычисляется как сумма частных расходов (ΔQ) между скоростными вертикалями (рис. 1.8):

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta Q_i = kV_1\omega_{0,1} + \left(\frac{V_1+V_2}{2}\right)\omega_{1,2} + \dots + \left(\frac{V_{n-1}+V_n}{2}\right)\omega_{n-1,n} + kV_n\omega_{n,0}, \quad (1.23)$$

где $\omega_{i-1,i}$ – площадь живого сечения между соседними скоростными вертикалями; V_i – средняя скорость на i -й вертикали; k – параметр, зависящий от характера берега. Значение k колеблется в пределах 0.7 – 0.9. При наличии мертвого пространства $k = 0.5$.

Площадь живого сечения между соседними скоростными вертикалями определяется по формуле прямоугольной трапеции, а для крайних вертикалей – по формуле треугольника (рис. 1.8). Общая площадь живого сечения определяется по формуле

$$\omega = \frac{h_1 b_0}{2} + \frac{(h_1 + h_2) b_1}{2} + \dots + \frac{h_n b_n}{2}, \quad (1.24)$$

где h_i – глубина на i -й вертикали; b_i – расстояние между скоростными вертикалями с номерами i и $i+1$.

Средняя скорость для всего живого сечения при известном расходе воды Q вычисляется по формуле

$$V_{\text{ср}} = \frac{Q}{\omega}. \quad (1.25)$$

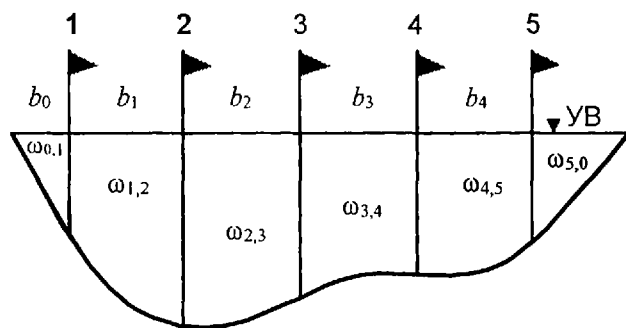


Рис. 1.8 Схема к вычислению расхода воды и площади живого сечения

1.16. Наблюдения за уровнями и методы их обработки

Наблюдения за колебаниями уровня проводятся на водомерных постах (рис.1.9,а) и заключаются в измерении высоты водной поверхности над некоторой постоянной плоскостью. За такую плоскость обычно принимают плоскость, проходящую через отметку, расположенную ниже самого низкого уровня воды. Абсолютную или относительную отметку этой плоскости называют *нулем графика* водомерного поста. Таким образом, *уровень воды* – это превышение водной поверхности над нулем графика выраженное в сантиметрах.

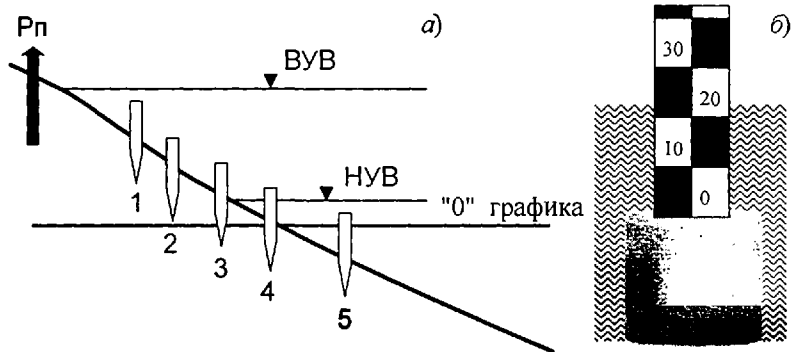


Рис.1.9. Свайный водомерный пост (а) и отсчет уровня над сваями по переносной рейке (б). Рп – репер; ВУВ – высокий уровень воды; НУВ – низкий уровень воды; 1 – 5 – номера свай

Измерения производятся с помощью водомерной рейки с точностью до одного сантиметра. Рейки бывают двух типов – постоянные и переносные. Постоянные рейки прикрепляются к устоям мостов или к свае, забитой в дно реки у берега. При пологих берегах и больших амплитудах колебаний уровня наблюдения за ними проводятся при помощи переносной рейки (рис.1.9,б). Для этого в русло реки и на пойме забивается ряд расположенных в створе свай. Отметки головок свай

связываются нивелировкой с репером водомерного поста, установленного на берегу, абсолютная или относительная отметка которого известна. Переносную рейку устанавливают на головку сваи и измеряют уровень воды. Зная отметку головки каждой сваи, можно выразить все измеренные уровни в превышениях над нулем графика.

Наблюдения на водомерных постах обычно проводятся два раза в сутки – в 8 и 20 часов. В период, когда уровни в течение суток быстро меняются, могут проводиться дополнительные наблюдения через 1, 2, 3 или 6 часов. Для непрерывной регистрации уровней применяются самописцы уровней.

По данным наблюдений составляется *таблица ежедневных уровней воды* (ЕУВ). В эту таблицу заносятся среднесуточные уровни воды, которые вычисляются на основе осреднения измеренных в течение суток срочных уровней. Кроме того, в таблицу ЕУВ заносятся:

- средний уровень за каждый месяц;
- максимальный срочный уровень за каждый месяц;
- минимальный срочный уровень за каждый месяц;
- средний уровень за год;
- максимальный срочный уровень за год;
- минимальный срочный уровень за год.

Данные наблюдений за уровнями воды публикуются в специальных изданиях – гидрологических ежегодниках. В гидрологических ежегодниках приводятся также сведения об измеренных и ежедневных расходах воды и ряде других характеристик.

1.17. Связь расходов и уровней воды

Между расходами воды и уровнями существует определенная зависимость $Q = f(H)$, известная в гидрологии как кривая расходов воды (рис. 1.10).

Кривая $Q = f(H)$ строится по данным об измеренных расходах, при этом не учитываются точки соответствующие зимним расходам, так как расходы, измеренные при ледоставе ($Q_{\text{зим}}$) при

одном и том же уровне меньше летних ($Q_{\text{л}}$). Причиной уменьшения расходов является увеличение шероховатости русла при ледовых явлениях и уменьшение площади живого сечения.

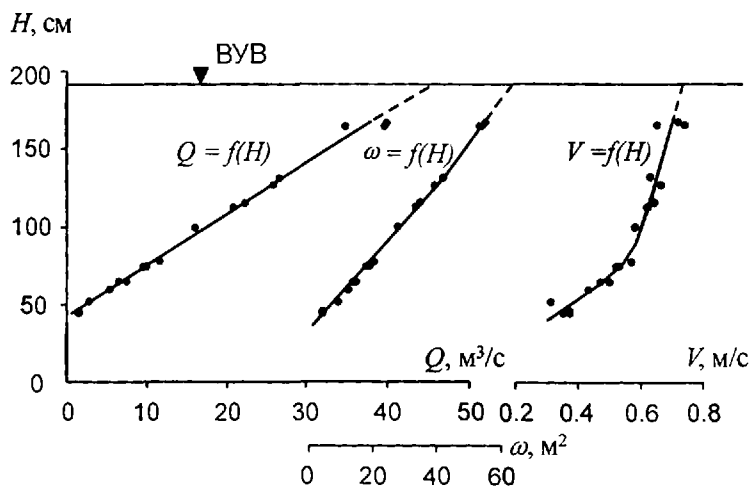


Рис. 1.10. Кривая расходов $Q = f(H)$, скоростей $V = f(H)$ и площадей живых сечений $\omega = f(H)$; ВУВ – высший уровень воды

Кривая расходов позволяет определить ежедневные расходы воды по известным уровням, которые наблюдаются на водомерном посту. Для периода, когда река свободна ото льда, пользование кривой не вызывает затруднений. Ежедневные уровни воды при ледовых явлениях можно определить с помощью той же кривой $Q = f(H)$ и хронологического графика $K_{\text{зим}} = f(T)$, с которого снимаются значения $K_{\text{зим}}$ на нужную дату, и производится расчет по формуле

$$Q_{\text{зим}} = K_{\text{зим}} Q_{\text{л}}. \quad (1.26)$$

Хронологический график $K_{\text{зим}} = f(T)$ строится по данным о расходах, измеренных при ледовых явлениях. Коэффициент $K_{\text{зим}}$

рассчитывается как отношение зимнего расхода ($Q_{\text{зим}}$) к расходу, снятому с кривой $Q = f(H)$ при том же уровне ($Q_{\text{л}}$). При наличии на реке ледовых явлений $K_{\text{зим}}$ меньше единицы, а когда река очищается ото льда $K_{\text{зим}} = 1$ (рис. 1.11).

Кривая $Q = f(H)$ строится вместе с кривыми $\omega = f(H)$ и $V = f(H)$, где ω – площадь живого сечения реки, а V – средняя скорость в сечении. По действующим нормативам эти три кривые должны быть увязаны так, чтобы для каждого значения уровня расход по кривой $Q = f(H)$ отличался от расхода, рассчитанного по формуле $Q = \omega V$ не более чем на 1% – 1.5% в верхней и средней частях кривой и не более чем на 3% – в нижней.

Вначале кривые проводятся в диапазоне уровней, при которых имеются измеренные расходы воды, а затем экстраполируются вверх до максимального зарегистрированного уровня и вниз – до минимального зарегистрированного уровня.

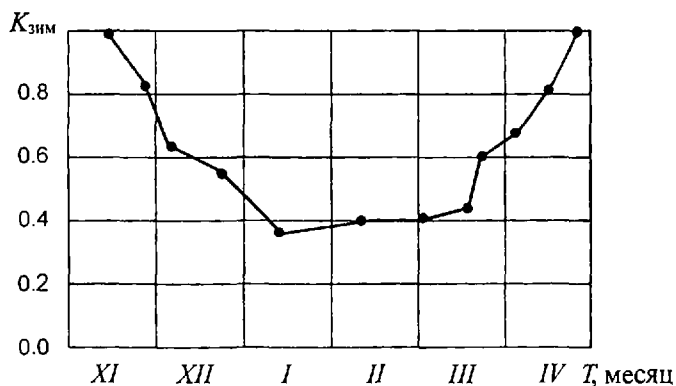


Рис. 1.11. Хронологический график коэффициента $K_{\text{зим}}$

Однозначность кривой расходов воды в ряде случаев нарушается и в период открытого русла. Такие ситуации возникают в силу следующих причин:

- при неустойчивом русле (намыв, размыв);

- при возникновении переменного подпора, вызванного несовпадением хода уровней данной реки и ее притока;
- в результате работы гидротехнических сооружений и др.

При наличии широкой поймы на кривой расходов может образоваться «петля» в верхней части графика за счет различия скоростей при выходе воды на пойму и при ее сходе.

Для каждого из перечисленных случаев разработаны специальные методики определения ежедневных расходов воды. Эти методики излагаются в курсе гидрометрии.

1.18. Речные наносы

1.18.1. Энергия и работа рек

Вода, стекающая под действием силы тяжести по склонам и руслам рек, обладает энергией, то есть способностью совершать работу. Потенциальная энергия реки на участке протяженностью L (км) при падении h (м) и среднем расходе на этом участке Q (м³/с) выражается формулой

$$\mathcal{E} = 9.81 \cdot 10^3 Q h \text{ (Дж)}, \quad (1.27)$$

а так как мощность – это работа, совершаемая в единицу времени (Дж/с = Вт), то потенциальная мощность реки на данном участке будет определяться выражением

$$N = 9.81 Q h \text{ (кВт)}. \quad (1.28)$$

На практике потенциальные запасы гидроэнергии определяют исходя из 8760 часов использования потенциальной мощности (8760 – число часов в году):

$$\mathcal{E}_r = 9.81 Q h 8760 \text{ (кВт·ч)}. \quad (1.29)$$

Помимо потенциальных гидроэнергоресурсов оценивается и так называемый *технический гидроэнергопотенциал*, т. е. та часть гидроэнергоресурсов, которая на современном уровне развития науки и техники может быть использована или уже используется для получения электроэнергии на гидроэлектростанциях. Соотношение между техническим и полным гидроэнергопотенциалами колеблется от 0.18 (Сырдарья) до 0.91 (Ангара). В целом по России этот коэффициент равен 0.50.

В естественных условиях энергия воды тратится на преодоление трения между частицами воды, трение о земную поверхность, на перемещение твердых частиц и растворенных веществ. В результате этой работы происходят процессы эрозии и аккумуляции наносов, что приводит к изменению форм земной поверхности, а также к изменению очертаний и глубин речных русел.

1.18.2. Формирование речных наносов

Речными наносами называются твердые минеральные частицы, переносимые потоком и формирующие русловые и пойменные отложения. Речные наносы образуются из горных пород и почв под действием ветровой и водной эрозии. Водная эрозия (разрушение земной поверхности под действием текущих вод) является основным источником речных наносов. Водная эрозия подразделяется на склоновую и русловую.

Интенсивность водной эрозии зависит от двух причин: от энергии стекающих вод и от сопротивляемости размыву поверхности, по которой стекают эти воды. Так как энергия потока на некотором участке зависит от расхода воды и падения, то при равной величине стока водная эрозия более ярко выражена на горных реках и значительно слабее – на равнинных. Интенсивность водной эрозии на одной и той же реке в течение года не постоянна, она возрастает в период прохождения больших расходов и снижается в период межени.

Сопrotивляемость поверхности земли размыву зависит от природных свойств этой поверхности, т. е. от свойств почв и грунтов, а также от густоты и характера растительного покрова. Следует особо подчеркнуть, что уничтожение растительного покрова и неправильная распашка могут привести к усилению эрозии, местному смыву почв, разрастанию овражно-балочной сети и в конечном итоге к увеличению мутности рек.

В конечном итоге интенсивность эрозии и формирование речных наносов зависят от физико-географических условий и хозяйственной деятельности. При отсутствии хозяйственной деятельности решающее значение имеют физико-географические факторы, часть из которых относятся к категории зональных, а другие являются азональными. К зональным относятся климатические условия, норма годового стока, характер почв, характер и распространение растительного покрова. К азональным относятся рельеф местности и распространение коренных пород.

1.18.3 Основные характеристики речных наносов

Речные наносы в зависимости от характера движения в потоке обычно подразделяют на *взвешенные* и *влекомые*. Взвешенные наносы перемещаются в толще речного потока. Влекомые наносы – это наносы, перемещаемые речным потоком в придонном слое и движущиеся скольжением, перекачиванием или сальтацией. Деление наносов на взвешенные и влекомые является достаточно условным, так как при изменении скорости потока частица может находиться то во взвешенном состоянии, то перемещаться по дну реки.

В соответствии с другой классификацией речные наносы подразделяют на транзитные и руслоформирующие. Малые частицы переносятся к устью реки преимущественно транзитом. Более крупные частицы передвигаются к устью поэтапно. При возрастании скоростей потока они движутся во взвешенном или влекомом состоянии, а при падении скоростей потока задержи-

ваются на отдельных участках, но при очередном изменении гидравлических свойств потока вновь начинают движение. Таким образом, постоянно происходит переформирование русла. Очевидно, что большую часть руслоформирующих наносов составляют влекомые наносы, а большую часть транзитных – взвешенные.

Количество наносов (в кг), переносимое рекой через поперечное сечение в единицу времени (T , с), называется расходом наносов. Обычно расход взвешенных наносов обозначается R или Q_s (кг/с), а расход влекомых наносов q (кг/с).

Суммарное количество наносов, переносимое рекой через поперечное сечение за некоторый интервал времени (сутки, месяц, год), называется стоком наносов за этот интервал:

$$W_R = 86.4 TR \text{ (т)}. \quad (1.30)$$

Количество взвешенных наносов, содержащихся в единице объема (1 м^3) воды, называется *мутностью* (ρ или S). Мутность выражается в г/м^3 :

$$\rho = (R 10^3) / Q. \quad (1.31)$$

Мутность речных вод значительно меняется по живому сечению потока, по его длине и во времени. Распределение мутности по живому сечению носит очень сложный и нередко беспорядочный характер. Как правило, мутность возрастает от поверхности к дну, так как в придонном слое содержится больше крупных частиц. Распределение мутности по ширине потока сильно меняется в зависимости от направления течения, местных размывов русла и берегов, наличия притоков и т. д. Известны случаи, когда наносы образуют отдельные движущиеся скопления – жилы.

По длине реки меняются и расход наносов, и мутность, и распределение наносов по фракциям. Обычно сток наносов возрастает по длине рек, но бывают случаи, когда эта общая зако-

номерность нарушается и сток наносов уменьшается вниз по течению (Амударья). Часть наносов таких рек откладывается постепенно в их поймах, протоках и дельтах. Уменьшение мутности по длине реки наблюдается на ряде крупных рек, текущих с юга на север (Обь, Енисей, Лена), обогащение материалами смыва на этих реках происходит значительно медленнее вниз по течению, чем увеличение их водности.

В течение года наибольшая мутность наблюдается в периоды прохождения половодий и паводков. Малая мутность на всех реках наблюдается в периоды, когда река переходит на питание грунтовыми водами.

1.18.4. Распределение мутности рек на территории России

Большая часть территории России отличается малой средней годовой мутностью рек (меньше 50 г/м^3). Южная граница этой зоны примерно совпадает с южной границей лесной зоны в европейской части и находится несколько севернее в азиатской. Южнее зоны малой мутности располагается зона с мутностью $50 - 100 \text{ г/м}^3$. В европейской части России эта зона включает в себя большую часть черноземных областей с неустойчивым увлажнением. Лесостепные и степные районы Западной Сибири и большая часть Русской равнины характеризуются мутностью рек от $100 - 250$ до $250 - 500 \text{ г/м}^3$. Высокая мутность наблюдается в междуречье низовьев Волги и Дона (1000 г/м^3) и на реках Алтая (до 1000 г/м^3), но самая большая мутность у рек Предкавказья ($4000 - 5000 \text{ г/м}^3$). Максимальная мутность зарегистрирована на р. Аксай (Дагестан), где она достигает 11800 г/м^3 .

1.19. Русловые процессы

Русловые процессы – это постоянно происходящие изменения морфологического строения речного русла и поймы под действием текущей воды.

Конкретные проявления русловых процессов (изменение положения русла и поймы, размыв и намыв дна и берегов) называются *русловыми деформациями*.

Физической причиной русловых деформаций является нарушение баланса наносов на тех или иных участках речного русла. Если фактический расход наносов (R) больше, чем транспортирующая способность потока ($R_{тр}$), то происходит отложение наносов и намыв дна; при $R < R_{тр}$, наоборот, размыв дна. Транспортирующая способность потока зависит от крупности наносов и гидравлических характеристик реки на данном участке (уклона, скорости, глубины).

В результате русловых деформаций и отложения наносов в русле реки и на пойме формируются характерные формы рельефа, которые называют *русловыми образованиями*. Простейшей формой русловых образований являются *гряды*. Гряда представляет собой скопления песчаных, иногда галечных, наносов на дне русла. В грядах выделяют следующие элементы: лобовой и тыловой откосы, гребень, подвалье, высоту и длину гряды (рис.1.12).

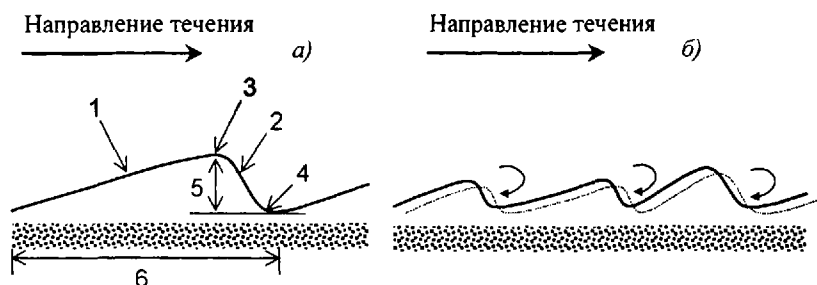


Рис.1.12. Основные элементы гряды (а) и схема ее перемещения (б): 1 – лобовой откос; 2 – тыловой откос; 3 – гребень; 4 – подвалье; 5 – высота; 6 – длина

Гряды – подвижные образования. Схематически механизм их перемещения можно представить следующим образом.

Поток, обтекающий грядку, отрывается от гребня и образует в подвалье вихревое движение с горизонтальной осью вращения. Частицы, смытые потоком с лобового ската встречным течением вихря, вымываются из подвалья и прижимаются к тыловому скату гряды. Таким образом, происходит наращивание гряды и перемещение ее вниз по течению.

Размеры гряд колеблются в широких пределах: высоты изменяются от нескольких сантиметров на малых реках до 5 – 6 метров на крупных (р. Обь), длина – от нескольких сантиметров до 3 км и более.

Русловые образования принято делить на три группы: микроформы, мезоформы и макроформы. К *микроформам* относятся донные гряды, размеры которых существенно меньше глубины и ширины русла. Скорость перемещения микроформ на реках обычно не превышает нескольких метров в сутки.

Мезоформы – это также состоящие из наносов гряды, но более крупного размера, соизмеримые с поперечным сечением русла. К мезоформам относятся речные перекаты, осередки, небольшие острова. Наиболее типичным видом мезоформы является крупная русловая гряда – *перекат*.

Перекатом называется мелководный участок русла, образованный наносной песчаной грядой, пересекающей русло под некоторым углом к общему направлению течения (*рис. 1.13.*).

Гребень переката соединяет верхнюю и нижнюю песчаные или галечные косы, которые называются побочными. Перекаты вместе с расположенными между ними понижениями – *плесами* – образуют на реках системы *плес – перекат*. Эти системы, как и другие русловые формы, медленно смещаются вдоль русла.

Другой вид мезоформ – *осередки* – подвижные, не соединенные с берегами и не заросшие растительностью отмели. Осередки часто возникают на перекатах, вызывая разделение потока на две ветви.

К макроформам относятся русловые образования, охватывающие значительные участки русла и поймы. К макроформам относятся излучины, пойменная и русловая многоруканность,

устья рек. Формирование и перемещение макроформ происходит более медленно по сравнению с другими русловыми образованиями, однако при наличии многолетних наблюдений эти процессы прослеживаются довольно четко.

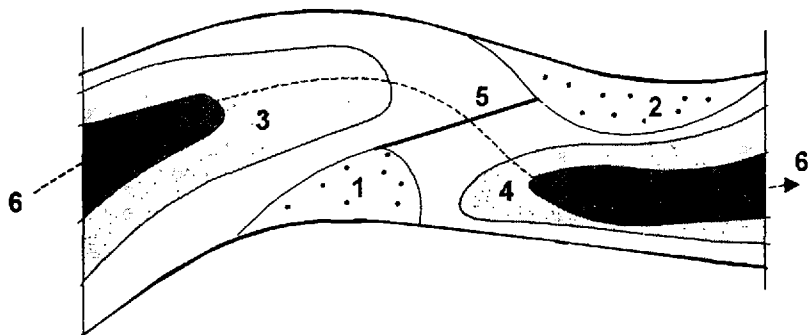


Рис. 1.13. Схема переката: 1 – верхняя коса; 2 – нижняя коса; 3 – верхняя плесовая ложина; 4 – нижняя плесовая ложина; 5 – гребень переката; 6 – линия наибольших глубин

Наиболее ярким примером многолетних деформаций является перемещение излучин вниз по течению реки. Этот процесс характерен для извилистых (меандрирующих) рек. В результате размыва берегов на таких реках происходит постепенный разворот и смещение излучины, что в конечном итоге приводит к размыву перешейка и спрямлению русла (рис. 1.14). Затем процесс развития излучины повторяется.

В реальных условиях характер и интенсивность русловых деформаций зависят от многих факторов, учесть которые количественно практически невозможно, поэтому в настоящее время для оценки устойчивости русла используются упрощенные модели. В качестве примера такой модели можно привести критерий устойчивости русла Великанова:

$$\eta = gd/v^2, \quad (1.32)$$

где g – ускорение свободного падения; d – средний диаметр частиц, слагающих русло; v – скорость течения в придонном слое.

Как видно из формулы, устойчивость русла увеличивается с возрастанием крупности частиц, слагающих русло реки, и резко уменьшается с увеличением скорости течения.

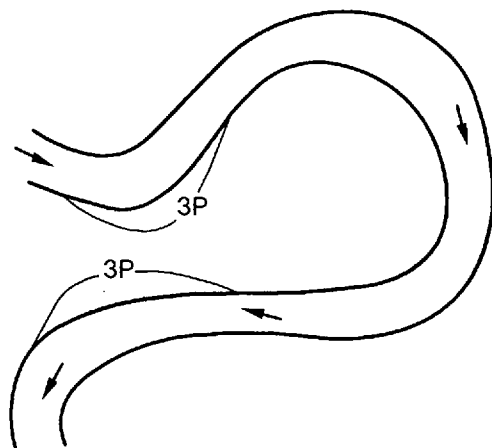


Рис. 1.14. Завершающая стадия развития излучины. ЗР – зона размыва

1.20. Гидрохимический режим рек

Речные воды имеют, как правило, сравнительно невысокую минерализацию и относятся к пресным водам. По степени минерализации О. А. Алекин подразделяет реки на четыре категории: малой минерализации (до 200 мг/л), средней минерализации (200 – 500 мг/л), повышенной минерализации (500 – 1000 мг/л) и высокой минерализации (более 1000 мг/л). Большинство российских рек зоны избыточного и достаточного увлажнения относятся к первым двум категориям. По мере продвижения на юг минерализация рек возрастает.

Минерализация речных вод зависит от характера питания реки. В период, когда река питается талыми или дождевыми водами, минерализация уменьшается, а когда она переходит на грунтовое питание, минерализация возрастает.

По химическому составу О.А. Алекин выделяет три категории речных вод:

- гидрокарбонатные и карбонатные – с преобладанием аниона $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$;
- сульфатные – с преобладанием аниона SO_4^{2-} ;
- хлоридные – с преобладанием аниона Cl^- .

Большинство рек земного шара, в том числе и России, принадлежит к гидрокарбонатному типу. Значительно меньше рек сульфатного, еще меньше хлоридного типа.

1.21. Гидрология озер

1.21.1. Основные определения

Озера – это естественные водоемы с замедленным водообменом. По характеру водообмена озера делят на две большие группы: сточные и бессточные.

Сточным называется озеро, из которого вытекает одна или несколько рек. К категории сточных относится большинство озер районов влажного и умеренного климата. Бессточные озера характерны для засушливых районов. Частным случаем сточных озер являются *проточные* озера, у которых одна из рек, впадающих в озеро, приносит примерно столько же воды, сколько выносит река, вытекающая из озера (например, оз. Чудское).

Интенсивность водообмена, т. е. скорость обновления вод, находящихся в озерной котловине, является важнейшим фактором, определяющим гидрологический, биологический и гидрохимический режим конкретного озера. В качестве основной характеристики внешнего водообмена сточных водоемов принят показатель условного водообмена $K_{\text{в}}$, равный отношению объема

стока из водоема V_Y за некоторый промежуток времени (обычно за год) к среднему объему воды водоема за тот же период V_{O3} :

$$K_B = V_Y / V_{O3} . \quad (1.33)$$

Для сравнения водообмена озер, различающихся по структуре водного баланса (в том числе и бессточных), используется другой показатель:

$$K_B^* = V_{YZ} / V_{O3} , \quad (1.34)$$

где V_{YZ} – сток из озера плюс испарение с его поверхности.

Показатель условного водообмена меняется в широком диапазоне и зависит от таких факторов, как размер озера, форма речной котловины, географическое положение и др. Так, для некоторых малых проточных озер Карелии K_B превышает 1000, т. е. обновление воды в озере происходит 1000 раз в год или несколько раз в сутки.

Для крупных глубоких озер, например, Онежского и Ладожского, показатель условного водообмена $K_B = 0.07 - 0.09$. Для того чтобы вода в таких озерах полностью обновилась потребуется 11 – 14 лет:

$$T = 1 / K_B . \quad (1.35)$$

На озере Байкал $K_B \approx 0.003$, что соответствует периоду полного обновления $T = 330 - 340$ лет.

1.21.2. Происхождение и строение озерных котловин

Размеры и форма озерных котловин определяются их происхождением. В соответствии с классификацией М. А. Первухина, в зависимости от происхождения котловины, озера подразделяются на следующие типы.

Тектонические озера образуются в прогибах и разломах земной коры. Котловины тектонического происхождения имеют наиболее крупные и глубокие озера – Ладожское, Онежское, Байкал, Иссык-Куль, Севан, Каспийское; африканские озера – Виктория, Ньяса, Танганьика; американские Великие озера – Эри, Онтарио, Гурон, Мичиган, Верхнее.

Вулканические озера располагаются в кратерах потухших вулканов или среди лавовых полей. Распространены в районах современной или древней вулканической деятельности (Исландия, Италия, Сицилия, Япония, Камчатка, Закавказье и др.).

Ледниковые озера возникли в результате деятельности современных и древних ледников. Озера этого типа располагаются в выпавших ледниками котловинах (I тип) или среди моренных отложений зоны древнего оледенения (II тип). Озера первого типа называются эрозионными, второго типа – аккумулятивными. Примером озер первого типа являются многочисленные озера Финляндии и Карелии. Озера второго типа распространены на севере и северо-западе ЕТР, в Прибалтике, Канаде, на севере США.

Гидрогенные озера образуются в результате эрозионной и аккумулятивной деятельностью речных и морских вод. К гидрогенным относятся озера, образовавшиеся из стариц, из плесов пересыхающих рек, озера речных дельт и озера морских побережий (лагуны и лиманы). *Лагуны* – это заливы, отчлененные от моря наносами. *Лиманы* – это устьевые участки рек, отделенные от моря косами.

Просадочные котловины образуются в результате проседания грунта. К категории просадочных озер относятся термокарстовые, суффозионные и карстовые.

Термокарстовые котловины образуются в районах многолетней мерзлоты в результате протаивания и проседания грунта. Котловины большей частью мелкие. Широко распространены в тундре, на севере Сибири, в Забайкалье.

Суффозионные котловины также возникают в результате просадки грунта в тех районах, где подземные воды вымывают

из грунта некоторые цементирующие соли и мелкие частицы. Для этих озер характерны пологие склоны и малые глубины. Типичны для степных и лесостепных районов с недостаточным увлажнением. В России их больше всего на юге западной Сибири.

Карстовые котловины формируются в районах залегания известняков, доломитов, гипсов. В результате химического воздействия на эти породы грунтовых вод в них образуются пустоты и провалы. Со временем эти пустоты и провалы заполняются водой. Озер этого типа много на Урале, в Крыму, на Кавказе, в Архангельской области, в районе Нижнего Новгорода. Иногда озера образуются не на поверхности, а под землей – в карстовых пещерах.

Золотые озера формируются в результате ветрового выдувания, их котловины располагаются между дюнами и барханами. Озера этого типа, как правило, небольшие и мелкие. Большое количество таких озер встречаются в Казахстане.

Метеоритные озера образуются в углублениях, возникших при падении метеоритов (оз. Каали в Эстонии).

Подпрудные озера образуются в горных системах при перегораживании речных долин обвалами или оползнями (Сарезское озеро на Памире в долине р. Мургаб).

Антропогенные озера образуются в результате человеческой деятельности. К этой категории относятся озера-водохранилища, пруды, а также озера, возникшие на месте старых карьеров, соляных копей и т. п.

С момента образования озера его водная масса, котловина, водосборный бассейн и заселяющие озеро организмы находятся в постоянном взаимодействии, в результате чего внешний вид котловины постепенно меняется. Наиболее сильное воздействие на котловину оказывает водная масса. Удары волн прибоя разрушают берега котловины. Продукты разрушения откладываются в основном вблизи мест разрушения и образуют подводную береговую террасу. Наиболее мелкие фракции во взвешенном состоянии переносятся течением и волнением вглубь озера и оседают на дне.

Котловина преобразуется также под влиянием вод поступающих в озеро с его водосборного бассейна. Наносы, которые приносят впадающие в озеро водотоки, частично осаждаются вблизи устьев рек формируя дельты, частично относятся озерными течениями и образуют отмели вдали от мест впадения рек. Тонкий речной ил проникает в открытую часть озера и равномерно осаждается по всему дну.

Одновременно с образованием озера начинается заселение его организмами. В эволюции озер растительные и животные организмы играют выдающуюся роль. Отмирая, эти организмы на разных стадиях разрушения и разложения оседают на дно, смешиваясь с неорганическими частицами. Формируются илы, происходит постепенное выравнивание дна котловины озера, его обмеление и зарастание.

1.21.3. Основные части озера и озерного дна

Наиболее пониженная часть озерной котловины, заполненная водой, называется *озерным ложем*, или *чашей* озера (рис. 1.15). В качестве уровня озерной чаши принимают уровень высоких вод (УВВ).

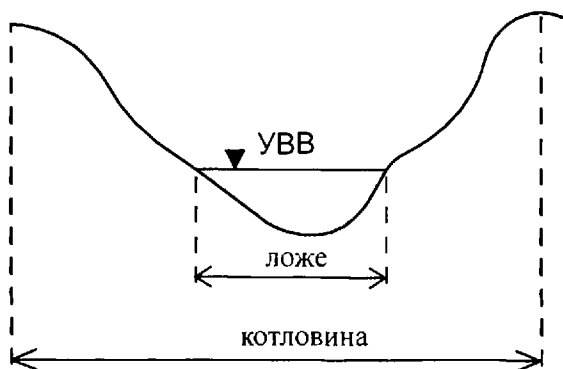


Рис. 1.15. Схема озерной котловины

В озерном ложе выделяют две основные области – береговую и глубинную. В береговой области преобладают процессы разрушения горных пород, слагающих котловину. Для глубинной области характерны процессы аккумуляции продуктов разрушения.

Береговая область включает в себя три зоны (рис. 1.16).

Собственно *берег* – часть суши, окружающая озеро (1). Берег состоит из берегового склона, который в верхней части заканчивается бровкой; за нижнюю границу берега принимают основание берегового склона, которое располагается на верхней границе воздействия волн прибоа. Берег постоянно разрушается и отступает от уреза воды вглубь суши.

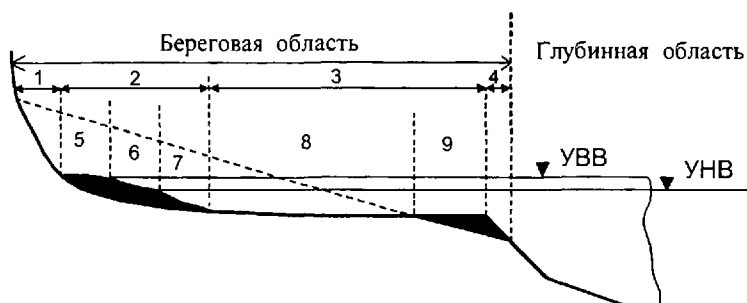


Рис. 1.16. Схема береговой области озера

Побережье – зона прибойной полосы (2). На побережье выделяют три области:

- *Подводное побережье* – эта область постоянно покрыта водой (7).
- *Затопляемое побережье* – эта область затопляется водой периодически, во время подъема уровня воды в озере (6).
- *Сухое побережье* – часть побережья, непосредственно прилегающая к берегу. Эта область не покрывается водой, но находится под влиянием прибойных волн (5).

Береговая отмель (3) имеет вид подводной террасы, которая заканчивается на границе с глубинной областью озера крутым склоном (4 – осыпь). Береговая отмель включает в себя размываемую часть (8) и намываемую часть (9).

Побережье и береговую отмель часто объединяют в одну зону, которую называют *литоралью*.

Глубинная область (*профундаль*) занимает наиболее глубокую часть дна, недоступную волнению. Между литоралью и профундалью выделяют небольшую переходную зону, которую называют *сублиторалью*.

Нижняя граница литорали обычно определяется глубиной действия волны, иногда границей проникновения солнечных лучей, лимитирующих зону распространения зеленой растительности. Глубина литорали обычно не превышает нескольких метров.

1.21.4. Основные морфометрические характеристики озера

К числу основных морфометрических характеристик озера относятся: площадь зеркала озера, длина и изрезанность береговой линии, глубина, объем водной массы и форма озерной котловины. Для определения морфометрических характеристик озера требуется батиметрическая карта, составленная на основании топографической съемки и промеров глубин.

Площадь водной поверхности (зеркала) – F_z зависит от уровня воды в озере. На практике наиболее часто используют значение F_z , соответствующее среднему многолетнему уровню воды (F_0). Различают площадь зеркала озера с островами и без островов.

Длина озера (l) – кратчайшее расстояние между двумя наиболее удаленными точками береговой линии, измеренное по поверхности озера.

Максимальная ширина озера ($B_{\max}$) – расстояние между наиболее удаленными точками береговой линии, измеренное по перпендикуляру к длине.

Средняя ширина озера ($B_{\text{ср}}$) – частное от деления площади зеркала озера на его длину:

$$B_{\text{ср}} = \frac{F_0}{l} . \quad (1.36)$$

Изрезанность береговой линии (K) характеризуется отношением длины береговой линии (L) к длине окружности круга, площадь которого равна площади озера:

$$K = \frac{L}{2\sqrt{F_0 \cdot \pi}} . \quad (1.37)$$

Объем озера (V) определяется графическим или аналитическим методом. При использовании графического метода строится зависимость площади зеркала от глубины озера, и объем рассчитывается как площадь подграфика, т. е. графически вычисляется интеграл

$$V = \int_{H_{\text{д}}}^{H_0} F(H) dH , \quad (1.38)$$

где $H_{\text{д}}$ – уровень дна озера; H_0 – уровень свободной поверхности.

При использовании аналитического метода интеграл (1.38) решается численно: интеграл заменяется суммой, шаг по оси уровней (h) принимается равным сечению изобат, а объемы воды, заключенные между плоскостями на уровне H и $H + h$, рассчитываются по формуле усеченной пирамиды (конуса):

$$V = \frac{h}{3}(f_i + f_{i+1} + \sqrt{f_i f_{i+1}}). \quad (1.39)$$

Средняя глубина озера ($H_{\text{ср}}$) – частное от деления объема озера на площадь зеркала,

$$H_{\text{ср}} = \frac{V}{F_0}. \quad (1.40)$$

Показатель формы озерной котловины (C) в наиболее простом случае определяется как отношение средней глубины к максимальной глубине:

$$C = \frac{H_{\text{ср}}}{H_{\text{max}}}. \quad (1.41)$$

Кроме выражения (1.41) в качестве показателя формы озерной котловины используется отношение средней глубины к глубине в центре тяжести водной массы.

1.21.5. Крупнейшие озера земного шара

Общий объем вод озер земного шара, по ориентировочным подсчетам, достигает 176 тыс. км², из которых 52% составляют пресные воды и 48% – минерализованные. Объем озер почти в 90 раз превышает суммарный объем воды в руслах рек и в 5 раз средний годовой сток всех рек мира. Большинство наиболее крупных озер мира (табл. 1.3) расположено в тектонических котловинах, лежащих в районах избыточного и достаточного увлажнения (равнинных или горных).

Таблица 1.3

Крупнейшие озера земного шара

Озеро	Площадь, тыс. км ²		Объем, км ³	Наибольшая глубина, м
	зеркала	водосбора		
<i>Европа</i>				
Каспийское	374	3100	78200	1025
Ладожское	17.7	258	908	230
Онежское	9.95	51.5	295	127
Венерн (Швеция)	5.55	46.8	180	100
Чудское с Псковским	3.55	44.2	25.0	15
<i>Азия</i>				
Аральское	(64.1)	(1830)	(1020)	(68)
Байкал	31.5	540	23000	1637
Балхаш	18.2	395	112	26
Тонлесап (Кампучия)	10.0	—	40	12
Иссык-Куль	6.2	15.7	1730	702
<i>Африка</i>				
Виктория	69.0	190	2700	92
Танганьика	32.9	237	18900	1435
Ньяса	30.9	94.1	7725	706
Чад	16.6	1200	44	(12)
Рудольф	8.66	153	—	73
<i>Северная Америка</i>				
Верхнее	82.7	128	11600	406
Гурон	59.8	—	3580	229
Мичеган	58.1	249	4680	281
Б. Медвежье	30.2	—	1010	137
Б. Невольничье	27.2	1000	1070	156
Эри	25.7	58.8	545	64
Онтарио	19.0	64.0	1710	236

Таблица 1.3 (продолжение)

Озеро	Площадь, тыс. км ²		Объем, км ³	Наибольшая глубина, м
<i>Южная Америка</i>				
Маракайбо (Венесуэла)	13.3	(49.7)	—	35
Титикака (Боливия, Перу)	8.11	35.8	710	230
<i>Австралия</i>				
Эйр	до 15	1114	—	20

Наибольшей озерностью отличаются увлажненные районы областей древнего оледенения: север и северо-запад Европы, Канада, север США.

Гидрографическая сеть некоторых водосборов представлена рядом озеровидных водоемов, соединенных речными участками в единую озерно-речную систему. В гидрологическом режиме таких систем сочетаются особенности рек и водоемов.

К крупнейшим озерно-речным системам можно отнести в Северной Америке реку Маккензи ($F = 1.8$ млн. км²) с озерами Атабаска, Невольничье, Большое Медвежье, а также реку Святого Лаврентия ($F = 1.29$ млн. км²) с озерами Верхнее, Гурон, Мичеган, Эри, Онтарио; в Африке – реку Белый Нил ($F = 198$ тыс. км²) с озерами Виктория, Кьога, Альберт.

Крупнейшая в России озерно-речная система включает Онежское озеро, реку Свирь, Ладожское озеро, реку Неву ($F = 281$ тыс. км²). На примере этой системы хорошо прослеживается регулирующая роль озер. Если на притоках Онежского озера Шуе и Водле весной проходит 47 – 48 % годового стока, а зима маловодна (12 – 19 %), то на соединяющей Онежское и Ладожское озера реке Свирь и вытекающей из Ладожского озера р. Неве сток внутри года распределен равномерно (весенний сток – 28 – 29 %, летне-осенний – 46 – 48 %, зимний – 24 – 25 %).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что изучает наука гидрология суши?
2. Назовите основной источник питания всех водных объектов суши?
3. Что называется водосбором водного объекта?
4. Что такое морфометрические характеристики речного водосбора?
5. Перечислите элементы расходной и приходной частей уравнения водного баланса речного водосбора.
6. Какой водный объект называется рекой?
7. Что называется истоком и устьем реки?
8. В чем различие больших, средних и малых рек?
9. Что называется поймой реки?
10. Перечислите основные типы речных долин.
11. Перечислите основные типы продольных профилей реки.
12. Что называется водным сечением потока? Перечислите его основные характеристики.
13. Назовите основные характеристики речного стока.
14. Перечислите основные источники питания рек.
15. Дайте определение основных фаз водного режима.
16. Как изменяются скорости течения речного потока по вертикали? Как вычисляется средняя скорость на вертикали?
17. Как рассчитывается расход воды в реке при наличии измерений скоростей потока на отдельных скоростных вертикалях?
18. Что называется «нулем графика» водомерного поста? Как он назначается?
19. Как устроен свайный водомерный пост?
20. Какие сведения заносятся в таблицу ежедневных уровней воды (ЕУВ)?
21. С какой целью строятся зависимости расходов от уровней воды $Q = f(H)$?
22. Как производится построение и увязка кривой $Q = f(H)$?

23. Что называется речными наносами? Причины их образования.
24. Перечислите основные характеристики речных наносов.
25. Как изменяется мутность рек по территории России?
26. Что такое русловые деформации? Физические причины русловых деформаций.
27. Назовите основные типы (группы) русловых образований.
28. Как классифицируются речные воды по степени минерализации.
29. Какой водный объект называется озером?
30. Что такое коэффициент водообмена?
31. Классификация озер по происхождению озерной котловины.
32. Перечислите основные части озера и озерного дна.
33. Перечислите основные морфометрические характеристики озера.
34. Назовите по три крупнейших озера Европы, Азии, Африки и Северной Америки.

2. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

2.1. Общие положения

Основная задача гидрологических расчетов – получить количественные характеристики, описывающие гидрологические явления и процессы в ближайшем и отдаленном будущем на основе анализа состояния этих объектов в прошлом и настоящем.

Например, при проектировании мостового перехода требуется рассчитать максимальные уровень и расход воды заданной вероятности ежегодного превышения (заданной обеспеченности). Для сооружений класса I закладывается вероятность превышения 1 раз в 10000 лет ($p = 0.01 \%$), для сооружений класса II – 1 раз в 1000 лет ($p = 0.1 \%$).

Можно сказать, что задача гидрологических расчетов – дать вероятностный прогноз той или иной гидрологической характеристики. При проектировании водозаборных устройств наиболее важными характеристиками являются минимальные уровень и расход воды. При расчете заиления водохранилищ требуется знать мутность воды и расход взвешенных наносов и т. д.

Знание расчетных гидрологических характеристик необходимо при проектировании гидротехнических сооружений, железных и автомобильных дорог, при сооружении мелиоративных систем и систем водоснабжения, разработке планов развития промышленных и сельскохозяйственных предприятий, оценке загрязнения водных экосистем и их охране; при строительстве населенных пунктов и т. д.

При определении расчетных гидрологических характеристик используются данные гидрометеорологических наблюдений на сети Госкомгидромета, опубликованные в официальных справочных изданиях, а также результаты экспедиционных и полевых исследований. Чем продолжительнее ряды наблюдений, тем с большей точностью рассчитываются искомые гидрологические характеристики.

К числу официальных документов, в которых можно получить исходную информацию о гидрологическом режиме водных объектов, относятся следующие издания:

- Гидрологические Ежегодники.
- Справочники по ресурсам поверхностных вод СССР, состоящие из трех серий по 20 томов каждая:

1. «Гидрологическая изученность» – серия, содержащая сведения об основных гидрографических характеристиках, количестве и размерах рек и озер, их стационарной и экспедиционной изученности, а также перечень основных опубликованных и хранящихся в архивах работ, в которых имеются данные о водных объектах.

2. «Основные гидрологические характеристики» (ОГХ) – серия, содержащая проверенные материалы наблюдений за режимом рек, озер и водохранилищ на станциях Росгидромета и других ведомств. Данный справочник состоит из трех книг. В первой книге опубликованы данные за период с начала наблюдений по 1962 г., во второй – за 1963 – 1970 гг., в третьей – за 1971 – 1975 гг. Данные за 1976 – 1980 гг. опубликованы в справочнике «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши» (МДС).

3. «Ресурсы поверхностных вод СССР» – серия монографий, представляющих собой научные обобщения данных о режиме рек, озер и водохранилищ;

При выполнении инженерных гидрологических расчетов необходимо использовать действующие федеральные и территориальные нормативные документы.

2.2. Основные гидрометеорологические характеристики, используемые в инженерных гидрологических расчетах

В практике гидрологических расчетов используются различные гидрометеорологические характеристики. Все эти характеристики можно условно разделить на четыре группы:

1. Гидрологические характеристики естественного режима водного объекта.
 2. Морфометрические характеристики рек, водосмов и их бассейнов.
 3. Метеорологические характеристики.
 4. Статистические характеристики, используемые при анализе рядов гидрометеорологических наблюдений.
- Перечислим наиболее важные из этих характеристик.

Гидрологические характеристики

- Расход воды – Q , м³/с или л/с (см. п 1.2.8).
- Модуль стока – q , л/с км² или м³/с км² (1.2.8).
- Слой стока – h , мм (1.2.8).
- Объем стока – W , км³ или м³ (1.2.8).
- Уровень воды в реке или водоеме – H , см (1.2.14).
- Расход взвешенных наносов – R , кг/с (1.2.16.3).
- Мутность ρ , г/м³ (1.2.16.3).

В зависимости от конкретной задачи используются средние или экстремальные значения перечисленных характеристик.

Морфометрические характеристики водных объектов и их водосборов

- Площадь водосбора – F , км² (см. п 1.1.3, 1.2.1).
- Средняя высота водосбора – $H_{\text{ср}}$, м (1.2.1).
- Средний уклон водосбора – $i_{\text{в}}$, ‰ (1.2.1).
- Коэффициент озерности – $f_{\text{оз}}$, % (1.2.1).
- Коэффициент залесенности – $f_{\text{л}}$, % (1.2.1).
- Коэффициент заболоченности $f_{\text{б}}$, % (1.2.1).
- Длина реки – $L_{\text{р}}$, км (1.2.4).
- Густота речной сети – d , км/км² (1.2.4).
- Уклон реки $i_{\text{р}}$, ‰ (1.2.6).

Перечисленные характеристики дают представление о строении речной сети и особенностях бассейна, используются в формулах при расчете основных режимных характеристик

речного стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений.

Метеорологические характеристики, используемые в инженерных гидрологических расчетах

- Слой осадков $-P$, мм. Используются годовые суммы осадков, суммы осадков за теплый и холодный период года, суммы осадков отдельных дождей. Слои осадков определяются по конкретным метеостанциям или рассчитываются средние по водосбору.
- Интенсивность осадков $-a_T$, мм/мин, рассчитывается по формуле

$$a_T = \frac{H_T}{T}, \quad (2.1)$$

где H_T – слой осадков (мм) за время T , мин.

- Слой испарения $-E$, мм. Рассчитывают испарение с водной поверхности, испарение с поверхности суши и суммарное испарение с поверхности водосбора. Методы расчета испарения подробно даны в [4].
- Дефицит влажности воздуха $-d$, мм рассчитывается по формуле

$$d = l_n - l_\phi, \quad (2.2)$$

где l_n – парциальное давление насыщенного водяного пара, мм; l_ϕ – фактическое парциальное давление водяного пара, мм.

- Температура воздуха $-t$, °C. Используется средняя температура за сутки, месяц, год.

Статистические характеристики гидрометеорологических рядов

- Среднее арифметическое значение (оценка математического ожидания):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} x_i}{n}, \quad (2.3)$$

где x_i – i -тое значение гидрологической характеристики, например, расхода или уровня воды; n – длина анализируемой выборки (количество членов ряда).

- Среднеквадратическое отклонение (стандартное отклонение):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2.4)$$

- Коэффициент вариации C_v :

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

где k_i – модульный коэффициент, определяемый по формуле

$$k_i = \frac{x_i}{\bar{x}}. \quad (2.6)$$

- Коэффициент асимметрии C_s :

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{(n-1)(n-2)C_v^3}. \quad (2.7)$$

- Коэффициент корреляции R :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.8)$$

где y_i и x_i – значения соответственно зависимой и независимой переменных.

- Коэффициент автокорреляции r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} [(x_i - \bar{x})(x_{i+1} - \bar{x})]}{(n-2)\sigma^2}. \quad (2.9)$$

2.3. Расчет гидрологических характеристик при разном объеме гидрометрической информации

Рассмотрим типичную задачу гидрологических расчетов. На реке X в створе Y требуется рассчитать среднегодовой расход однопроцентной обеспеченности (вероятность превышения 1 раз в 100 лет).

Для решения такого рода задач в гидрологии используются методы теории вероятностей и математической статистики, а также методы гидрологической аналогии и пространственной интерполяции. Выбор того или иного метода зависит, прежде всего, от объема имеющейся гидрометрической информации.

При расчете гидрологических характеристик водных объектов мы сталкиваемся с тремя вариантами, каждый из которых имеет свои специфические особенности.

1. *Расчет при наличии длинного ряда гидрометрических наблюдений.* Расчет базируется на статистической обработке имеющегося ряда.

2. *Расчет при недостаточности данных гидрометрических наблюдений.* В основе расчетной методики лежит метод гидрологической аналогии. Ряд на расчетной реке приводится к многолетнему периоду по данным рек-аналогов с более продолжительными рядами наблюдений.

3. *Расчет при отсутствии данных гидрометрических наблюдений* производится с использованием формул и карт.

2.3.1. Расчет гидрологических характеристик при наличии длинного ряда гидрометрических наблюдений

В гидрологии ряд считается длинным, если погрешность расчета среднего значения ряда не превышает 5–10%, а погрешность расчета коэффициента вариации не превышает 10–15%. Хотя расчет каждой гидрологической характеристики имеет свои особенности, методический подход во всех случаях един и базируется на использовании методов теории вероятностей и математической статистики. Общая схема расчета включает следующие этапы.

1. *Предварительный анализ исходных данных.* На этом этапе производится анализ надежности экстраполяции кривой $Q = f(H)$; выполняется проверка полноты учета стока воды на поймах и в протоках; оценивается точность расчета стока за различные интервалы времени и т. д. Цель такой проверки – оценить надежность исходной информации и выявить грубые ошибки и опечатки.

2. *Проверка ряда на случайность.* Цель данной проверки – выбор наиболее адекватной математической модели для описа-

ния вероятностной структуры гидрологического ряда. В качестве нулевой принимается гипотеза о том, что ряд соответствует модели случайной величины. Если нулевая гипотеза опровергается, то принимается альтернативная гипотеза. В большинстве случаев – это модель авторегрессии первого порядка (простая цепь Маркова).

Для проверки случайности используются различные статистические критерии, описание которых дано в [8]. В практике гидрологических расчетов наиболее часто используется критерий значимости коэффициента автокорреляции:

$$r < \sigma_r t_{2\alpha}, \quad (2.10)$$

где r – коэффициент автокорреляции, определяемый по формуле (2.9); σ_r – его абсолютная погрешность; $t_{2\alpha}$ – нормированная ордината нормального закона распределения при уровне значимости 2α (обычно $2\alpha = 5\%$ или 10%).

Значение σ_r рассчитывается по формуле

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-2}}. \quad (2.11)$$

Гипотеза о случайности ряда не опровергается, если выполняется неравенство (2.10).

3. *Проверка ряда на однородность.* Гидрологический ряд считается однородным, если в течение всего рассматриваемого периода условия формирования стока оставались неизменными. Антропогенное воздействие и природные катаклизмы могут привести к изменению условий формирования стока и нарушить однородность ряда. Например, в результате землетрясения могут измениться границы водосбора, а работа водохранилища сезонного регулирования приводит к перераспределению стока внутри года и увеличению суммарного испарения. В этом случае

нельзя применять стандартные методы статистической обработки рядов.

Для проверки гидрологических рядов на однородность обычно используются статистические критерии Фишера и Стьюдента [8].

Критерий Фишера используется для проверки однородности ряда по дисперсии. Исходный ряд делится на две части, затем определяются дисперсии для каждой из частей ряда и рассчитывается эмпирическое значение статистики Фишера:

$$F^* = \frac{D_1^*}{D_2^*}, \quad (2.12)$$

где $D_1^* > D_2^*$.

Гипотеза об однородности ряда по дисперсии не опровергается, если выполняется неравенство

$$F^* < F_{2\alpha}, \quad (2.13)$$

где $F_{2\alpha}$ – теоретическое значение статистики Фишера при уровне значимости 2α (обычно $2\alpha = 5$ или 10%).

Для проверки однородности ряда по среднему значению рассчитывается эмпирическое значение статистики Стьюдента:

$$t^* = [(\bar{x} - \bar{y})/S] \sqrt{n_x n_y / (n_x + n_y)}, \quad (2.14)$$

где $\bar{x}$ и $\bar{y}$ – средние значения по первой и второй частям ряда; n_x и n_y – длина первой и второй частей ряда.

Параметр S в выражении (2.14) определяется по формуле

$$S = \sqrt{[(n_x - 1)\sigma_x^2 + (n_y - 1)\sigma_y^2] / (n_x + n_y - 2)}, \quad (2.15)$$

где σ_x и σ_y – среднеквадратические отклонения соответственно для первой и второй частей ряда, определяемые по формуле (2.4).

Гипотеза об однородности ряда по среднему значению не опровергается, если выполняется неравенство:

$$t^* < t_{2\alpha}, \quad (2.16)$$

где $t_{2\alpha}$ – теоретическое значение статистики Стьюдента при уровне значимости 2α (также как и в предыдущем случае: $2\alpha = 5$ или 10 %).

4. *Расчет параметров распределения.* Обычно рассчитываются среднее значение ряда, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии. Расчет производится по формулам (2.3, 2.5, 2.7). Если коэффициент вариации больше 0.5, следует произвести уточнение указанных характеристик, используя метод наибольшего правдоподобия [8].

Учитывая то, что коэффициент асимметрии и отношение C_s/C_v рассчитываются с большой погрешностью, рекомендуется использовать районное отношение C_s/C_v . Районное отношение C_s/C_v получают путем осреднения этого показателя по группе рек в пределах гидрологически однородного района.

5. *Расчет погрешностей параметров распределения.* Если расчет параметров распределения производился с использованием выражений (2.3, 2.5, 2.7), то их относительные погрешности определяются по следующим формулам.

Относительная погрешность среднего значения:

$$\varepsilon_{\bar{x}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \cdot 100 \% . \quad (2.17)$$

Относительная погрешность коэффициента вариации:

$$\varepsilon_{C_v} = \frac{\sqrt{1+C_v}}{\sqrt{2n}} \cdot 100 \% . \quad (2.18)$$

Относительная погрешность коэффициента асимметрии:

$$\varepsilon_{C_s} = \frac{1}{C_s} \sqrt{(6/n)(1+6C_v^2+5C_v^4)} \cdot 100 \% . \quad (2.19)$$

Расчет считается надежным, если погрешность среднего значения ряда не превышает 5 – 10 %, а погрешность коэффициента вариации не превышает 10 – 15 %. В противном случае ряд следует удлинить, используя данные по рекам-аналогам.

6. *Построение эмпирической кривой обеспеченностей.* Для построения эмпирической кривой обеспеченностей значения исходного ряда ранжируются (располагаются в убывающем порядке). Затем для каждого члена ранжированного ряда (x_m) рассчитывается эмпирическая обеспеченность по формуле

$$p_m = \frac{m}{n+1} 100 \% , \quad (2.20)$$

где m – порядковый номер в ранжированном ряду; n – длина ряда.

Эмпирическая кривая обеспеченностей строится на специальной клетчатке вероятностей в виде последовательности точек с координатами p_m , x_m . Кривую обеспеченностей можно строить как в абсолютных значениях гидрологической характеристики, так и в модульных коэффициентах.

7. *Расчет ординат аналитической кривой обеспеченностей.* Для объективного сглаживания эмпирической кривой обеспеченностей и экстраполяции ее в область больших и малых значений используются специальные аналитические кривые. В России для этой цели используется кривая Крицкого-Менкеля (трехпараметрическое гамма-распределение). Ординаты этой

кривой представлены в виде таблиц и приводятся в [6,8,10]. В таблицах даны ординаты кривой Крицкого-Менкеля в виде модульных коэффициентов (k_p) для фиксированных соотношений C_s/C_v и различных C_v . Переход от модульных коэффициентов к значениям расчетной гидрологической характеристики производится по формуле

$$x_p = k_p \bar{x}, \quad (2.21)$$

где p – расчетная обеспеченность; $\bar{x}$ – среднее значение гидрологической характеристики. Аналитическую кривую тоже наносят на клетчатку вероятностей (рис.2.1). Если аналитическая кривая хорошо согласуется с эмпирической кривой обеспеченностей, то в дальнейших расчетах используются ординаты аналитической кривой.

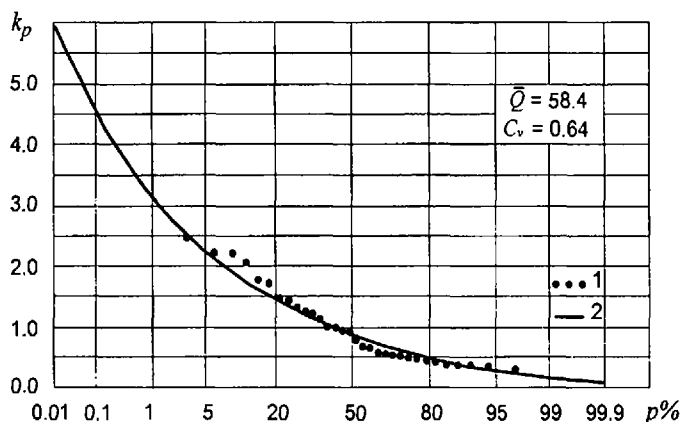


Рис.2.1. Эмпирическая кривая обеспеченностей (1) и аналитическая кривая обеспеченностей Крицкого-Менкеля при $C_s/C_v = 2.5$ (2) максимальных расходов дождевых паводков на р. Луге – ст. Толмачево.

Следует иметь в виду, что изложенная схема является достаточно общей и расчет каждой гидрометеорологической ха-

рактеристики имеет свои особенности. Подробное изложение этих методик дается в специальной гидрологической литературе.

2.3.2. Расчет гидрологических характеристик при ограниченности данных гидрометрических наблюдений

Если погрешность расчета среднего значения больше 10 %, или погрешность расчета коэффициента вариации более 15 %, то ряд считается коротким и его следует удлинить, используя более продолжительные ряды по рекам-аналогам.

При выборе реки-аналога учитываются следующие моменты.

- Расчетная река и река-аналог должны находиться в пределах одного гидрологически однородного района. Колебания стока на обеих реках должны носить синхронный характер.
- Обе реки должны иметь сходные гидрографические и морфометрические характеристики. При этом особое внимание следует обращать на такие показатели как коэффициенты озерности, заболоченности, залесенности, средняя высота водосбора и уклон реки. Площади водосбора должны различаться не более чем в 5 – 10 раз.
- Режим реки-аналога не должен искажаться под влиянием антропогенной деятельности.
- Ряд наблюдений на реке-аналоге должен быть длиннее, чем на расчетной реке не менее чем на 10 – 15 лет. Совместный период наблюдений на обеих реках должен быть не менее 10 лет.

Общая схема расчета при наличии короткого ряда наблюдений включает следующие этапы (случай одного аналога).

1. Подбирается потенциальная река-аналог, которая удовлетворяет перечисленным выше требованиям.

2. Для расчетной реки и реки-аналога за период совместных наблюдений рассчитываются параметры уравнения линейной регрессии:

$$x_{pp} = ax_{pa} + b, \quad (2.22)$$

где x_{pp} и x_{pa} – значение расчетной гидрологической характеристики соответственно на расчетной реке и реке-аналоге; a – коэффициент регрессии; b – свободный член уравнения.

3. Оценивается надежность полученного уравнения. Связь считается надежной, если выполняются следующие условия:

$$n \geq 10; |R| \geq 0,7; |R|/\sigma_R \geq 2; |a|/\sigma_a \geq 2, \quad (2.23)$$

где R – коэффициент парной корреляции, определяемый по формуле (2.8); σ_R – среднеквадратическая ошибка коэффициента корреляции; σ_a – среднеквадратическая ошибка коэффициента регрессии. Подробно о расчете параметров уравнения регрессии и их ошибок смотри [8].

4. По уравнению (2.22) ряд расчетной реки приводится к многолетнему периоду.

5. По восстановленному ряду рассчитываются новые статистические характеристики, прежде всего – среднее значение и коэффициент вариации. Оцениваются их погрешности. Расчет считается надежным, если после удлинения ряда погрешности расчета среднего значения и коэффициента вариации снизились и не превышают соответственно 10 % и 15 %.

Дальнейший расчет ведется также как и при наличии длинного ряда (см. п 2.3.1 – этапы 6 – 7).

2.3.3. Расчет гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

Расчет различных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений производится по разным методикам и не может быть сведен к единой схеме. Однако можно назвать несколько основных методов.

Метод пространственной интерполяции. Этот метод используется в тех случаях, когда расчетная гидрологическая характеристика не зависит от площади водосбора водного объекта и плавно меняется по территории. Разновидностью этого метода является *метод гидрологического картирования*.

Разработка региональных формул. Метод используется в тех случаях, когда существует достаточно хорошая зависимость между расчетной гидрологической характеристикой и морфометрическими или метеорологическими характеристиками. Считается, что характер таких зависимостей остается неизменным в пределах достаточно больших территорий со сходными условиями формирования стока.

Водно-балансовый метод. Этот метод основан на использовании уравнения водного баланса для некоторого достаточно большого интервала времени. Так, например, можно приближенно рассчитать слой годового стока, зная суммарный слой испарения с поверхности водосбора и годовую сумму осадков.

Метод математического моделирования. При использовании этого метода процессы движения воды на водосборе описываются с помощью уравнений математической физики. В качестве входных данных используются метеорологические данные. Основной проблемой здесь является идентификация параметров модели. Обычно эти параметры устанавливают по данным полевых исследований или по рекам-аналогам.

2.4. Построение и использование разностных интегральных кривых

В рядах годового стока рек, как правило, наблюдается чередование групп маловодных и многоводных лет, что приводит к образованию так называемых «циклов водности». Один цикл водности включает в себя маловодную и многоводную фазы. Продолжительность циклов на реках не постоянна, поэтому не следует отождествлять наличие циклов в рядах годового стока с регулярными колебаниями по типу синусоиды.

Наиболее наглядное представление о циклах колебания годового стока дает разностная интегральная кривая (РИК), которая представляет собой график зависимости

$$\frac{\sum_{i=1}^{i=T} (k_i - 1)}{C_v} = f(T), \quad (2.24)$$

где k_i – модульный коэффициент, определяемый по формуле (2.6); C_v – коэффициент вариации, определяемый по формуле (2.5); T – время (годы).

Разностная интегральная кривая всегда начинается с нуля и заканчивается на нуле. Если в i -том году сток выше среднего, то РИК поднимается вверх, если ниже среднего – опускается вниз, при этом границы циклов соответствуют точкам перелома на РИК.

Разностные интегральные кривые удобны также при анализе синхронности колебаний стока на нескольких реках. В этом случае строят несколько РИК с единой осью времени (рис. 2.2).

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

$$\bar{k} = \frac{C_v(l_k - l_n)}{m}, \quad (2.25)$$

где $\bar{k}$ – среднее значение модульного коэффициента за рассматриваемый отрезок времени; l_k, l_n – конечная и начальная ординаты РИК для рассматриваемого отрезка времени; m – длина этого отрезка. Графически это означает, что если точку, соответствующую l_k , соединить с l_n , то тангенс угла наклона этого отрезка будет положительным, когда сток выше нормы ($\bar{k} > 1$) и отрицательным, когда ниже нормы ($\bar{k} < 1$).

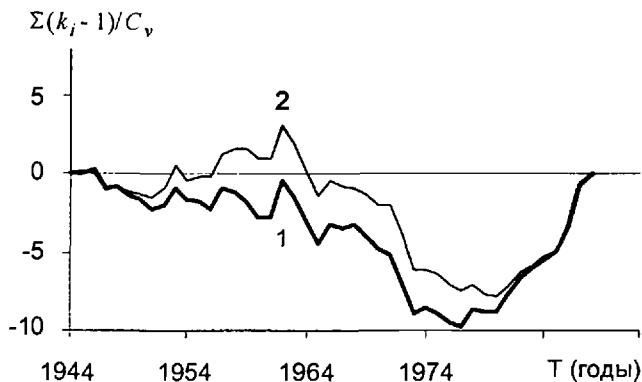


Рис. 2.2. Разностные интегральные кривые среднегодовых расходов воды за 1945 – 1988 гг. для р. Луги в створах г. Кинзисепп (1) и ст. Толмачево (2)

2.5. Расчет нормы годового стока

Нормой годового стока называется средняя многолетняя величина годового стока определяемая за период, включающий в себя не менее двух полных циклов водности при неизменных ландшафтных и климатических условиях и при неизменном уровне хозяйственного использования реки.

Переводя это определение на формальный язык можно определить норму стока следующим образом. Норма стока – есть среднеарифметическая величина стока при условии, что исходный ряд является однородным, а погрешности расчета среднего значения и коэффициента вариации не превосходят 10 %.

Норму стока можно выразить в виде среднего многолетнего расхода воды ($\bar{Q}$), среднего многолетнего модуля стока ($\bar{q}$), среднего многолетнего слоя годового стока ($\bar{h}$) и среднего многолетнего объема годового стока ($\bar{W}$). В качестве примера запишем формулу для определения нормы стока в расходах:

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i}{n}, \quad (2.26)$$

где Q_i – среднегодовой расход в i -том году; n – длина ряда.

Норма годового стока является основной и устойчивой характеристикой, определяющей общую водность рек и потенциальные водные ресурсы данного бассейна или района. Можно сказать, что она служит своего рода гидрологическим «эталонном» или «репером».

По территории России норма годового стока меняется весьма значительно. В зоне избыточного увлажнения средний многолетний модуль годового стока достигает 10–20 л/с км² и даже более. В засушливых районах его величина может составлять менее 1 л/с км².

Как расчетная гидрологическая характеристика норма стока используется в гидроэнергетике, при орошении и обводнении территорий, при проектировании водохранилищ, при планировании систем водоснабжения и т. д.

Если погрешности среднего значения и коэффициента вариации превышают допустимые значения, то ряд считается коротким и его следует привести к многолетнему периоду по методике изложенной в п.2.3.2 (этапы 1–5) и только после этого производить расчет нормы стока по формуле (2.26).

2.5.1. Расчет нормы годового стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

Норма годового стока средней реки (см. п.1.6) является климатической характеристикой. Действительно, уравнение водного баланса речного водосбора средней реки для многолетнего периода имеет вид

$$\bar{h} = \bar{P} - \bar{E}, \quad (2.27)$$

где $\bar{h}, \bar{P}, \bar{E}$ – средние многолетние значения соответственно слоя речного стока, осадков и испарения. Так как норма осадков и норма испарения являются климатическими характеристиками, то и норма стока также является климатической характеристикой. Как любая климатическая характеристика норма стока плавно меняется по территории и, следовательно, может картироваться.

Говоря другими словами – теоретической основой построения карт изолиний нормы годового стока, является положение о неизменности среднего уровня увлажненности отдельных территорий и наличие зональности в гидрологическом режиме рек.

При построении карт следует учитывать следующие моменты.

- Норма стока при картировании должна выражаться в размерности слоя годового стока (мм) или модуля годового стока (л/с км^2) чтобы исключить влияние площади водосбора.
- Значения нормы стока относят не к створу наблюдений, а к центру водосбора, так как норма стока является интегральным показателем водности всего водосборного бассейна.
- При картировании должны использоваться данные только по средним рекам, так как на режим малых рек оказывают влияние местные факторы, а большие реки могут пересекать несколько климатических зон.

Таким образом, расчет нормы годового стока средних рек при отсутствии данных гидрометрических наблюдений может проводиться по картам или путем пространственной интерполяции с использованием данных наблюдений на близлежащих створах.

Последний вариант карты нормы годового стока рек России составлен в ГГИ в 1980 г. по материалам гидрометрических наблюдений до 1975 г. и опубликован в 1986 г. [10]. Карта построена в масштабе 1:10000000 для всей территории бывшего Советского Союза, и в масштабе 1:2500000 для горных районов Карпат, Кавказа и Средней Азии. Региональные карты

годового стока опубликованы в справочниках по водным ресурсам.

Современные данные о годовом стоке и разработанная методика построения карт годового стока позволяют определить его величину для неизученных рек с точностью в среднем $\pm 10 - 15\%$ в лесной зоне и $20 - 25\%$ в степной зоне и в горных областях.

Расчет нормы годового стока на малых и больших реках имеет свою специфику. В пределах достаточно обширных территорий средний многолетний модуль стока средних рек в зависимости от площади водосбора меняется незначительно — наблюдаются небольшие колебания относительно зональной нормы. В то же время норма стока малых и больших рек может быть как выше так и ниже зональной (рис.2.3).

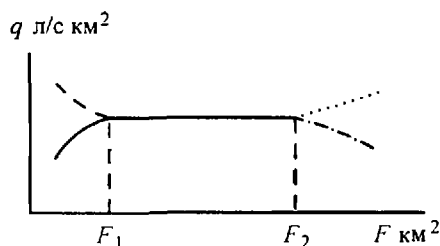


Рис.2.3. Виды связи среднего многолетнего модуля стока с площадью водосбора реки

На рисунке можно выделить две критические площади: F_1 — граница между малыми и средними реками, F_2 — граница между средними и большими реками. Значение F_1 зависит в основном от глубины залегания грунтовых вод: чем они ближе к поверхности, тем меньше F_1 . По территории России первая критическая площадь меняется весьма значительно — от $10-30 \text{ км}^2$ в зоне избыточного и достаточного увлажнения до $2000-3000 \text{ км}^2$ в засушливых районах. Значения F_2 более стабильны по территории и находятся обычно в пределах $50-75 \text{ тыс. км}^2$.

Карты изолиний среднего многолетнего стока допускается использовать и для определения нормы стока на малых реках, т. е. имеющих площади бассейна меньше первой критической. Для этого необходимо ввести в значение стока, снятого с карты, поправку, учитывающую различие в стоке зональных и азональных рек:

$$\bar{q} = k\bar{q}_k, \quad (2.28)$$

где $\bar{q}_k$ – зональный модуль стока, определенный по карте изолиний стока; k – поправочный коэффициент.

Значение k принимается средним по району или географической зоне в зависимости от площади водосбора малой реки. Например, в лесной зоне для рек с площадью бассейна 10 км² значение k меняется от 0.8 до 1.0 в зависимости от района, а в степной зоне ЕТР может быть принято единое значение $k = 2.0$.

На крупных реках, как правило, имеется несколько гидрометрических постов и норма стока для створа, где нет наблюдений, рассчитывается путем интерполяции между соседними створами.

При наличии на реке 4–5-ти гидрометрических постов можно построить зависимость среднего многолетнего расхода воды от площади водосбора и использовать ее для створов, где наблюдения за расходами воды не проводятся.

Перечисленные выше методы расчета нормы годового стока основаны на принципе пространственной интерполяции. Эти методы наиболее часто применяются в практике гидрологических расчетов, однако существуют и другие методы.

В горных районах, где прослеживается вертикальная зональность, используются зависимости среднего многолетнего модуля стока от средней высоты водосбора $\bar{q} = f(H)$.

Норму стока можно определять и по уравнению водного баланса (формула 2.27). Рассчитанную таким образом норму стока называют климатической нормой. Однако данный расчет

является весьма неточным из-за больших ошибок определения средних по бассейну осадков и испарения.

2.6. Расчет среднегодовых расходов различной обеспеченности

Расчет среднегодовых расходов воды различной обеспеченности при достаточном и ограниченном объеме данных гидрометрических наблюдений производится в соответствии с методиками, изложенными в 2.3.1 и 2.3.2.

2.6.1. Расчет среднегодовых расходов различной обеспеченности при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений норма годового стока определяется по методике, изложенной в 2.5.1.

Коэффициент вариации определяется на основе пространственной интерполяции с использованием данных наблюдений на близлежащих реках-аналогах или по карте изолиний.

В приложении к [10] имеется карта коэффициентов вариации годового стока для всей территории России в масштабе 1:10000000.

Допускается также определять коэффициент вариации годового стока по эмпирической формуле

$$C_v = \frac{A}{\bar{q}^{0.4} (F + 1000)^{0.1}}, \quad (2.29)$$

где A – параметр, определяемый обратным путем по данным рек-аналогов; $\bar{q}$ – средний многолетний модуль годового стока (л/с км²); F – площадь водосбора (км²).

По территории России коэффициент вариации годового стока меняется от 0.15–0.20 – в зонах избыточного и достаточного увлажнения, до 0.8–1.0 – в засушливых районах.

Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации (C_s/C_v) принимается постоянным в пределах гидрологически однородных районов. Это значение рассчитывается как среднее по группе рек с наиболее продолжительными рядами наблюдений.

В приложении к [10] имеется карта районов с постоянными значениями C_s/C_v в масштабе 1:22000000 для всей территории нашей страны. Для большей части России отношение C_s/C_v годового стока равно 2.

При известных значениях C_v и отношения C_s/C_v по таблице ординат аналитической кривой Крицкого-Менкеля для расчетной обеспеченности p % определяется модульный коэффициент k_p .

Модуль среднегодового стока расчетной обеспеченности определяется по формуле

$$q_p = \bar{q} k_p. \quad (2.30)$$

Для перехода от модуля годового стока к расходам воды, слоям и объемам годового стока используются формулы (1.12 – 1.14).

Для лучшего усвоения материала, изложенного в 2.6, в приложении I приводится блок-схема, иллюстрирующая порядок расчета среднегодовых расходов воды при разном объеме гидрометрической информации.

2.7. Расчет максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков

Расчет максимальных расходов половодий и паводков при достаточном и ограниченном объеме данных гидрометрических

наблюдений производится в соответствии с методиками, изложенными в 2.3.1 и 2.3.2.

В процессе разработки методов расчета максимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений учитывался тот факт, что максимальные модули стока (а не только расходы) зависят от площади водосбора и, следовательно, не могут картироваться. В настоящее время для расчета максимального стока применяются различные формулы, основные типы которых будут рассмотрены ниже.

2.7.1. Основные типы формул, используемых для расчета максимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

Максимальные расходы весеннего половодья преобладают над дождевыми максимумами на средних и больших реках большей части территории России и являются расчетными. На малых водосборах ($F < 100\text{--}200 \text{ км}^2$) максимумы дождевых вод редкой повторяемости часто бывают выше максимальных расходов весеннего половодья.

Многие сооружения проектируются и строятся на реках или в непосредственной близости к рекам, не изученным в отношении максимального стока. Кроме того, когда проектируется сооружение на изученной реке, створ его далеко не всегда совпадает со створом наблюдений, поэтому расчеты максимальных расходов заданных обеспеченностей чаще выполняются при отсутствии гидрометрических наблюдений – по формулам и по аналогам.

Точность максимумов, вычисленных по той или иной формуле, зависит, прежде всего, от надежности обоснования главных расчетных параметров натурными данными и точности этих данных, а также от возможности корректирования параметров по мере увеличения объема материалов наблюдений за максимальным стоком. Это очень важное требование учитывается при выборе расчетной формулы.

Вторым, не менее важным, требованием, предъявляемым к расчетным формулам, является простота самой формулы и методов определения ее параметров.

В то же время нужно иметь в виду, что при всех благоприятных обстоятельствах точность максимумов, вычисленных по формулам, не может быть выше точности гидрометрических материалов по максимальным расходам, которая также не всегда бывает достаточной.

Все формулы максимальных расходов обычно делятся на три группы.

Редукционные формулы, отражающие убывание (редукцию) модуля максимального стока с возрастанием площади водосбора.

Формулы предельной интенсивности стока, основанные на тезисе о том, что максимальный модуль стока формируется за счет предельной интенсивности дождя (или водоотдачи из снега) за время добегания τ . При этом под предельной интенсивностью подразумевается максимум средней интенсивности дождя (или водоотдачи из снега) за интервал времени τ .

Объемные формулы, выражающие максимальный расход в зависимости от объема (или слоя), продолжительности и геометрической формы половодья или паводка.

Редукционные формулы

В наиболее простом случае редукционная формула имеет вид

$$q_{\max} = \frac{A}{(F+1)^n}, \quad (2.31)$$

где $q_{\max}$ – максимальный модуль стока половодья или паводка; F – площадь водосбора; n – районный показатель редукции, характеризующий интенсивность убывания модуля максимального стока с увеличением площади водосбора; A – элементарный

модуль стока (характеризует сток с элементарной площадки при $F \rightarrow 0$).

В отличие от максимального модуля стока параметр A не зависит от площади водосбора и может картироваться. Вторым параметром формулы – n является районной константой.

Чтобы определить параметр n для гидрологически однородного района, строится зависимость максимального (обычно однопроцентного) модуля стока от площади водосбора. При этом по оси абсцисс откладываются значения $\lg(F + 1)$, а по оси ординат – $\lg(q_{\max})$ (рис.2.4).

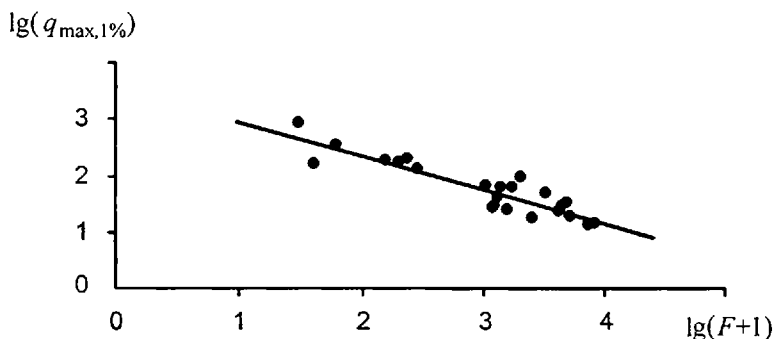


Рис.2.4. График зависимости максимальных модулей дождевого стока от площади водосбора для рек Брянской области

Данная зависимость описывается уравнением прямой линии:

$$\lg(q_{\max}) = -n \lg(F + 1) + b, \quad (2.32)$$

где n – искомая величина показателя редукции.

При известном показателе редукции по опорным створам, где имеются данные наблюдений за максимальными расходами воды, рассчитываются элементарные модули стока (A), которые

впоследствии картируются. Расчет параметра A производится обратным путем по формуле (2.31).

При расчете по формуле (2.31) переход от максимального модуля стока к расходу воды осуществляется по формуле (1.13).

Формулы предельной интенсивности стока

Для вывода формулы предельной интенсивности рассмотрим упрощенную схему формирования паводка.

Разобьем водосбор на три элементарные площадки с равным временем добегаания (рис.2.5). Таким образом, время добегаания на данном водосборе составит 3 условные единицы времени ($\tau = 3$).

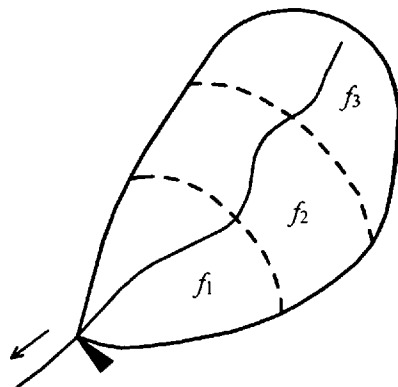


Рис.2.5. Условный водосбор; пунктиром обозначены изохроны
– линии равного времени добегаания

Пусть на водосбор выпал дождь из 5 порций осадков: $h_1 = 1$ мм, $h_2 = 4$ мм, $h_3 = 7$ мм, $h_4 = 5$ мм, $h_5 = 2$ мм (рис.2.6).

В соответствии с принятой схемой к концу первой единицы времени сформируется расход Q_1 за счет стока первой порции осадков с первой площадки. К концу второй единицы времени сформируется расход Q_2 , за счет стока второй порции осадков с первой площадки и первой порции осадков со второй площадки и т. д.

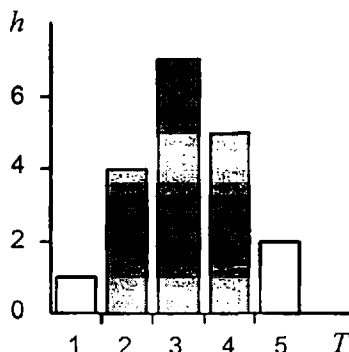


Рис. 2.6. Условный дождь, состоящий из 5 порций осадков; темным цветом выделена наиболее интенсивная часть дождя за время добега $\tau = 3$

Текущие расходы воды на конец каждого интервала записываются равенствами:

$Q_1 = f_1 h_1$	— одна площадка, $\sum h = 1$ мм;
$Q_2 = f_1 h_2 + f_2 h_1$,	— две площадки, $\sum h = 5$ мм;
$Q_3 = f_1 h_3 + f_2 h_2 + f_3 h_1$,	— вся площадь водосбора, $\sum h = 12$ мм;
$Q_4 = f_1 h_4 + f_2 h_3 + f_3 h_2$,	— вся площадь водосбора, $\sum h = 16$ мм;
$Q_5 = f_1 h_5 + f_2 h_4 + f_3 h_3$,	— вся площадь водосбора, $\sum h = 14$ мм;
$Q_6 = f_2 h_5 + f_3 h_4$,	— две площадки, $\sum h = 7$ мм;
$Q_7 = f_3 h_5$,	— одна площадка, $\sum h = 2$ мм;

Таким образом, максимум будет сформирован, когда задействована вся площадь водосбора и наиболее интенсивная часть дождя. В данном случае максимальным является расход, сформированный к концу четвертой единицы времени:

$$Q_{\max} = Q_4 = f_1 h_4 + f_2 h_3 + f_3 h_2. \quad (2.33)$$

Рассчитаем среднюю интенсивность дождя в наиболее интенсивной его части за интервал времени $\tau = 3$:

$$\bar{a}_\tau = \frac{h_2 + h_3 + h_4}{\tau} = \frac{4 + 7 + 5}{3} = \frac{16}{3} = 5.33. \quad (2.34)$$

В формуле (2.33) заменим h_2 , h_3 и h_4 на $\bar{a}_\tau$:

$$Q_{\max} = f_1 \bar{a}_\tau + f_2 \bar{a}_\tau + f_3 \bar{a}_\tau = \bar{a}_\tau (f_1 + f_2 + f_3) = \bar{a}_\tau F. \quad (2.35)$$

Если разделить правую и левую части выражения (2.35) на площадь водосбора и добавить коэффициент стока, то получим простейший вариант формулы предельной интенсивности:

$$q_{\max} = \alpha \bar{a}_\tau, \quad (2.36)$$

где $q_{\max}$ — модуль максимального стока; α — так называемый объемный коэффициент стока.

В реальных условиях не все выпавшие осадки участвуют в формировании паводка: часть осадков пополняет грунтовые горизонты, а часть идет на увлажнение почвы и заполнение отрицательных форм микрорельефа. Эта часть осадков составляет потери паводочного стока. Коэффициент α показывает, какая часть осадков действительно участвует в формировании паводка. Коэффициент стока всегда меньше единицы.

Формула предельной интенсивности обычно применяется для расчета максимального паводочного стока на малых реках, где время добегания меньше продолжительности паводкоформирующих дождей. На таких водосборах время добегания составляет несколько часов, и максимальные расходы формируются относительно короткими интенсивными ливнями.

Основными параметрами формулы предельной интенсивности являются коэффициент стока α и время добегания τ . Для их определения используются различные региональные зависимости от физико-географических и морфометрических факторов.

Для определения предельной интенсивности дождя за время добегания τ производится статистическая обработка осадков по ближайшим метеостанциям.

Объемные формулы

В основе вывода объемных формул лежит схематизация гидрографа половодья или паводка в виде той или иной геометрической фигуры. Рассмотрим наиболее простой случай, когда гидрограф схематизируется в виде треугольника (рис. 2.7).

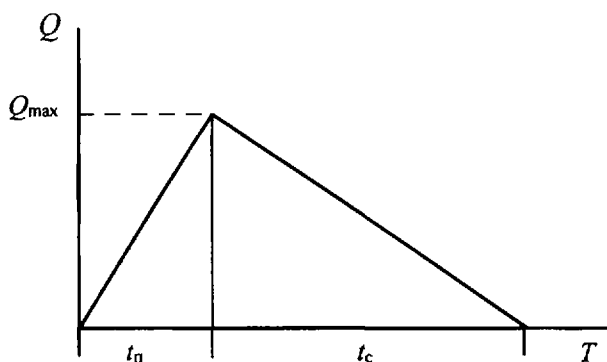


Рис. 2.7. Схематизация гидрографа паводка в виде треугольника.

В этом случае объем стока за паводок представляет собой площадь треугольника:

$$W = \frac{1}{2} Q_{\max} (t_n + t_c), \quad (2.37)$$

где $Q_{\max}$ — максимальный паводочный расход; t_n — продолжительность подъема паводка; t_c — продолжительность спада паводка. Отсюда максимальный расход равен

$$Q_{\max} = \frac{2W}{t_{\Pi} + t_c}. \quad (2.38)$$

С учетом формул (1.12, 1.14) перейдем от объема к слою паводочного стока:

$$Q_{\max} = \varphi \frac{k F h}{t_{\Pi} + t_c}, \quad (2.39)$$

где F – площадь водосбора; h – слой паводочного стока; k – коэффициент размерности; φ – коэффициент формы гидрографа. При схематизации гидрографа по треугольнику $\varphi = 2$.

Если принять нелинейный вариант схематизации гидрографа, то коэффициент φ будет иметь другое значение. Например, в формуле Д. Л. Соколовского гидрограф схематизируется в виде двух сходящихся в вершине параболических кривых подъема и спада. В этом случае значение φ обычно заключено в диапазоне от 2 до 4.

Расчетными параметрами формулы (2.39) являются φ , t_{Π} , t_c и h . Значения φ , t_{Π} , t_c рассчитывают по региональным зависимостям от климатических, морфологических и морфометрических факторов. Слои половодий и паводков находятся на основе пространственной интерполяции или по картам изолиний.

2.7.2. Расчет максимальных расходов воды весеннего половодья при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

В соответствии с действующими нормативными документами максимальные расходы весеннего половодья средних и малых рек рассчитываются по формуле

$$Q_p = \frac{k_0 h_p \mu_p F}{(F + c)^n} \delta \delta_1 \delta_2, \quad (2.40)$$

где Q_p – максимальный расход весеннего половодья обеспеченностью p , %; F – площадь водосбора, км²; h_p – слой стока весеннего половодья обеспеченностью p , %; k_0 – коэффициент, характеризующий дружность весеннего половодья; n – районный показатель редукции; c – коэффициент, характеризующий снижение редукции в зоне малых площадей водосбора; μ_p – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимального расхода воды; $\delta, \delta_1, \delta_2$ – коэффициенты, учитывающие снижение модуля максимального стока соответственно под влиянием озерности, залесенности и заболоченности.

Параметр k_0 , характеризующий дружность весеннего половодья, определяется по данным рек-аналогов обратным путем по формуле (2.40).

Значение слоя весеннего половодья заданной вероятности превышения p , % рассчитывается в два этапа.

На первом этапе определяются статистические характеристики слоя половодья. Норма слоя половодья $\bar{h}$ и коэффициент вариации слоя половодья определяются на основе пространственной интерполяции или по картам изолиний. Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации для слоя половодья принимается постоянным в пределах гидрологически однородных районов.

На втором этапе с использованием таблиц ординат аналитической кривой Крицкого-Менкеля и полученных статистических параметров рассчитывается слой весеннего половодья заданной обеспеченности – h_p .

Остальные параметры формулы (2.40) определяются по таблицам и формулам в зависимости от физико-географических и морфометрических факторов. Методика определения этих параметров изложена в пособии [10].

Формула (2.40) относится к категории редукционных формул. Действительно, если принять значения коэффициентов μ_p , c , δ , δ_1 , δ_2 равными единице и разделить обе части выражения (2.40) на произведение $h_p F$, то получим типичную редукционную формулу:

$$\frac{q_p}{h_p} = \frac{k_0}{(F+1)^n}, \quad (2.41)$$

где q_p – максимальный модуль стока весеннего половодья вероятностью превышения p , %.

В отличие от формулы (2.26) здесь для определения показателя редукции n строится зависимость $\lg(q_p/h_p) = f(F+1)$.

Кроме того, в формулу (2.40) введен дополнительный параметр c , характеризующий снижение редукции в зоне малых площадей водосбора, что позволяет использовать ее для расчета максимального стока не только на средних, но и на малых реках.

2.7.3. Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

В соответствии с действующими нормативными документами максимальные расходы дождевых паводков средних рек обеспеченностью p , % рассчитываются по формуле

$$Q_p = q_{200} \left(\frac{200}{F} \right)^n \delta \delta_2 \delta_3 \lambda_p F, \quad (2.42)$$

где q_{200} – максимальный модуль дождевого стока вероятностью превышения $p = 1$ % при $\delta = \delta_2 = \delta_3 = 1$, приведенный к площади водосбора 200 км^2 ; λ_p – переходный коэффициент от максимальных расходов обеспеченности $p = 1$ % к другой вероятности превышения; n – районный показатель редукции модуля

максимального дождевого стока; δ , δ_2 – коэффициенты, учитывающие снижение модуля максимального стока соответственно под влиянием озерности и заболоченности; δ_3 – коэффициент, учитывающий изменение параметра q_{200} с изменением средней высоты водосбора в горных районах.

Параметр q_{200} определяется на основе пространственной интерполяции или по картам изолиний.

Остальные параметры формулы (2.42) определяются по таблицам и формулам в зависимости от физико-географических и морфометрических факторов. Методика определения этих параметров изложена в пособии [10].

Формула (2.42) также относится к категории редукционных. Параметр q_{200} связан с элементарным модулем стока соотношением

$$q_{200} = \frac{A}{200^n}. \quad (2.43)$$

Если подставить (2.43) в выражение (2.42) и разделить обе части последнего на площадь водосбора, то при $\delta = \delta_2 = \delta_3 = \lambda_p = 1$ вновь получаем типичную редукционную формулу:

$$q_{1\%} = \frac{A}{F^n}, \quad (2.44)$$

где $q_{1\%}$ – максимальный модуль дождевого стока вероятностью превышения $p = 1\%$.

В формуле (2.42) отсутствует параметр, характеризующий уменьшение редукции в зоне малых площадей водосбора, поэтому ее можно использовать для расчета максимального дождевого стока только на средних реках.

Для расчета максимального дождевого стока малых рек используется другая формула:

$$Q_p = q_{1\%}^* \varphi H_{1\%} \delta \lambda_p F, \quad (2.45)$$

где $q_{1\%}^*$ – максимальный модуль дождевого стока ежегодной вероятности превышения $p = 1\%$, выраженный в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$ при $\delta = 1\%$; $H_{1\%}$ – максимальный суточный слой осадков ежегодной вероятности превышения $p = 1\%$; φ – сборный коэффициент стока; δ – коэффициент, учитывающий снижение модуля максимального стока под влиянием озерности; λ_p – переходный коэффициент от максимальных расходов вероятности превышения $p = 1\%$ к другой вероятности превышения.

Данная формула относится к категории формул предельной интенсивности стока, так как параметр $q_{1\%}^*$ по сути представляет собой предельную интенсивность осадков за время добега τ , но выражен в долях от произведения $\varphi H_{1\%}$. Для определения $q_{1\%}^*$ для территории России разработаны таблицы редукции осадков. По этим таблицам можно определить $q_{1\%}^*$ в зависимости от района, времени склонового добега и ряда морфометрических характеристик.

Максимальный суточный слой осадков $H_{1\%}$ определяется по данным ближайших к бассейну метеорологических станций.

Остальные параметры формулы (2.45) определяются по таблицам и формулам в зависимости от физико-географических и морфометрических факторов. Методика определения этих параметров изложена в пособии [10].

Для лучшего усвоения материала, изложенного в разделе 2.7, в приложении 2 приводится блок-схема, иллюстрирующая порядок расчета максимальных расходов воды при разном объеме гидрометрической информации.

2.8. Расчет минимальных расходов воды

В годовом цикле изменения водности рек отчетливо выделяются многоводные и маловодные сезоны. На большинстве рек России наблюдаются два маловодных сезона: летне-осенний и зимний. При этом во избежание разделения зимнего сезона рассматривается не календарный, а гидрологический год.

Речной сток, наблюдающийся в маловодные сезоны при отсутствии значительных паводков, принято называть *меженным*, а время, в течение которого он наблюдается, – *меженным периодом*.

В меженном периоде имеется отрезок времени, когда сток является наименьшим. Период наименьшего стока продолжительностью до 30 суток называется *периодом минимального стока*. В этот период реки питаются практически лишь подземными водами, хотя в меженный период в питании рек частично могут участвовать и поверхностные воды.

Данные о минимальном и меженном стоке применяются при разработке проектов питьевого и хозяйственно-бытового, а также промышленного водоснабжения, в горнодобывающей промышленности, при проектировании ГЭС, ТЭЦ и АЭС. Большое значение меженный и минимальный сток имеют для орошения, на которое расходуется до 75 % всех потребляемых вод.

Вопросы охраны вод от загрязнения и истощения также не могут решаться без данных о минимальных расходах воды. В промышленно развитых районах сброс сточных вод может быть не только сопоставим с минимальным стоком, но и превышать его, поэтому даже очищенные технические воды могут привести к загрязнению реки в результате накопления загрязняющих веществ в ее русле.

Имеются отрасли хозяйства, не допускающие даже кратковременных перебоев в подаче воды. В то же время сток распределен весьма неравномерно как внутри года, так и по территории. Меженный период может длиться пять–семь месяцев, и сток в этот период может составлять лишь 20–10% от объема годового стока. Особо остро вопросы водообеспечения стоят

в южных районах России в период летней межени, а также в северных районах, в Сибири и на Дальнем Востоке, где зимний меженный период является очень длительным и большое количество рек перемерзает.

К числу основных характеристик минимального стока относятся минимальные суточные и минимальные 30-суточные расходы за зимний и летне-осенний периоды.

Под минимальным 30-суточным расходом конкретного года понимается средний расход за 30 суток в период наиболее низкого стока в зимний или летне-осенний сезоны. Таким образом, в каждом году выделяется минимальный 30-суточный зимний и минимальный 30-суточный летне-осенний расходы. Если в отдельные годы межень прерывается значительными паводками, то для осреднения, вместо 30-суточного, используется более короткий период (24 – 26 суток). Таким образом, достигается генетическая однородность ряда минимальных расходов.

Под минимальным суточным расходом конкретного года понимается наиболее низкий среднесуточный расход за зимний или летне-осенний сезон.

В практике водохозяйственного проектирования основными расчетными характеристиками минимального стока являются:

- средние многолетние минимальные суточные и 30-суточные расходы воды для зимнего и летне-осеннего сезонов;
- минимальные суточные и 30-суточные расходы воды расчетной вероятности ежегодного превышения (обеспеченности), в основном в диапазоне $p = 75 - 97 \%$;
- абсолютный минимум, являющийся самым наименьшим суточным расходом воды за весь период наблюдений. Он показывает максимально возможную естественную степень истощения речного стока.

Расчет минимальных суточных и 30-суточных расходов воды заданной обеспеченности при наличии данных гидрометрических наблюдений производится по методикам, изложенным в 2.3.1 и 2.3.2.

2.8.1. Расчет минимальных расходов воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений

Расчет минимальных расходов воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений производится по-разному для средних и малых рек.

На средних реках модули минимального стока не зависят от площади водосбора, в то время как на малых такая зависимость прослеживается довольно четко. В данном случае к малым рекам относятся реки не полностью дренирующие грунтовый сток в меженный период.

Размер водосбора, до которого река считается малой (первая критическая площадь), устанавливается путем построения зависимости модуля минимального 30-суточного стока от площади водосбора (аналогично тому, как это делалось для годового стока см. 2.5.1.). Такие зависимости строятся для однородных по физико-географическим условиям районов.

В равнинных районах зоны избыточного и переменного увлажнения критическая площадь бассейна колеблется в основном в пределах 1000–1500 км² в зимний и летне-осенний сезоны. В зоне недостаточного увлажнения, где постоянные водоносные горизонты залегают на большой глубине, эта площадь увеличивается до 2000 – 2500 км². На территории с наличием постоянно пересыхающих или перемерзающих на длительный срок рек (Восточная Сибирь, Северо-Восток РФ) критическая площадь возрастает до 5000 – 10000 км².

Расчет минимального стока средних рек

Минимальный сток рек, имеющих площадь бассейна больше первой критической, но не превышающую 75000 км² (вторая критическая), формируется под влиянием зональных факторов, поэтому минимальный сток таких рек определяется по картам изолиний.

В настоящее время имеются карты изолиний 80-процентных 30-суточных минимальных модулей стока для зимнего и летне-осеннего сезонов в масштабе 1:10000000 [10].

Переход от модулей стока к расходам воды осуществляется по формуле (1.13).

Переход от минимальных расходов воды обеспеченностью $p = 80\%$ к минимальным расходам других обеспеченностей производится по формуле

$$Q_p = \lambda_p Q_{80\%}, \quad (2.46)$$

где λ_p – коэффициент, который определяется по специальным таблицам [10] в зависимости от района и расчетной обеспеченности.

Переход от 30-суточных минимальных расходов воды к суточным осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{сут}} = k Q_{30}, \quad (2.47)$$

где k – переходный коэффициент, который определяется по специальным таблицам [13] в зависимости от района (отдельно для зимнего и летне-осеннего сезонов).

Расчет минимального стока малых рек

Минимальный сток малых рек зависит от дренирующей способности реки и местных условий района. В качестве основного интегрального показателя условий формирования минимального стока используется площадь бассейна для равнинных и полугорных районов, а в горах – средняя высота водосбора.

В общем виде зависимость минимального расхода воды от площади водосбора для территории России может быть представлена формулой, предложенной А. М. Владимировым [6,10]:

$$Q_{30} = a(F \pm f)^n, \quad (2.48)$$

где Q_{30} – минимальный 30-суточный расход воды 80%-ной обеспеченности; F – площадь водосбора реки; a, f, n – районные

параметры, определяемые отдельно для зимнего и летне-осеннего сезонов [10].

Переход от расходов воды обеспеченностью $p = 80\%$ к минимальным расходам других обеспеченностей осуществляется по формуле (2.46), а переход к суточным расходам – по формуле (2.47).

Для лучшего усвоения материала, изложенного в разделе 2.8, в приложении 3 приводится блок-схема, иллюстрирующая порядок расчета минимальных расходов воды при разном объеме гидрометрической информации.

2.9. Расчет внутригодового распределения стока

При расчете внутригодового распределения стока рассматриваются среднемесячные расходы за водохозяйственные годы. За начало водохозяйственного года принимается наиболее ранняя дата наступления многоводной фазы с округлением до месяца. На практике за начало водохозяйственного года принимают первый месяц, для которого средняя многолетняя величина месячного расхода превышает норму годового стока. Для большей части территории России наиболее многоводной фазой является весеннее половодье и, следовательно, водохозяйственный год начинается с началом весны. В отличие от календарного года водохозяйственный год начинается в разные сроки в различных климатических зонах. Так, на большей части северо-запада ЕТР водохозяйственный год начинается с 1 апреля, а в Восточной Сибири – с 1 мая.

Водохозяйственный год делится не на четыре, а на три сезона; два смежных сезона, со сходными условиями формирования стока, объединяются в один составной. Для северо-запада ЕТР сходные условия формирования стока наблюдаются летом и осенью. В эти сезоны сток рек формируется за счет грунтового питания и жидких осадков. Поэтому для данной территории составным сезоном является сезон *лето–осень*. Весной река пита-

ется главным образом за счет таяния снега, а зимой переходит преимущественно на грунтовое питание.

Два смежных сезона, когда сток лимитирует потребление, объединяются в лимитирующий период, следовательно, нелимитирующий период всегда состоит из одного сезона.

Внутри лимитирующего периода выбирается лимитирующий сезон. Следовательно, лимитирующий период состоит из лимитирующего и нелимитирующего сезонов (рис.2.8).

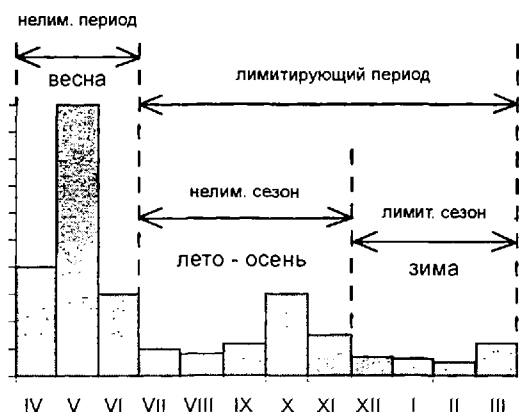


Рис.2.8. Схема разбивки водохозяйственного года на сезоны и периоды при расчете внутригодового распределения стока

Назначение лимитирующего периода и сезона зависит от конкретной задачи. Так, для сельского хозяйства лимитирующим сезоном является лето—осень, а для нужд водоснабжения лимитирующим будет самый маловодный сезон в году (для северо-запада ЕТР — зима).

Расчет внутригодового распределения стока в соответствии с действующими нормативными документами можно производить либо методом компоновки сезонов, либо методом реального года. В настоящем курсе рассматривается только последний метод.

2.9.1. Расчет внутригодового распределения стока методом реального года

Данная методика применяется при наличии регулярных наблюдений за стоком не менее 10–15 лет. На первом этапе устанавливается дата начала водохозяйственного года и производится его разбивка на сезоны. В таблицах 2.1 и 2.2 даны ориентировочные границы сезонов для различных районов России.

Таблица 2.1

**Примерные сроки и продолжительность
основных гидрологических сезонов
для Европейской территории России и прилегающих территорий**

Район	Название сезона и число месяцев в сезоне (числитель); границы сезона (знаменатель)		
Крайний Север (севернее 64° с. ш.)...	<u>В (3)</u> V-VII	<u>Л-О (4)</u> VIII-XI	<u>З (5)</u> XII-IV
Лесная зона (севернее 56° с. ш. и восточнее 30° в. д.)	<u>В (3)</u> IV-VI	<u>Л-О (5)</u> VII-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Южная часть лесной зоны и лесостепная зона (севернее 49° с. ш.)	<u>В (3)</u> III-V	<u>Л-О (6)</u> VI-XI	<u>З (3)</u> XII-II
Степная зона (южнее 49° с. ш.) и юго-западная часть Прибалтики (южнее 57° с. ш. и западнее 24° в. д.)	<u>В (3)</u> II-IV	<u>Л-О (7)</u> V-XI	<u>З (2)</u> XII-I
Прикарпатье и Забайкалье	<u>В (3)</u> III-V	<u>Л-О (6)</u> VI-XI	<u>З (3)</u> XII-II
Горные районы Крыма	<u>З-В (6)</u> XII-V	<u>Л (3)</u> VI-VIII	<u>О (3)</u> IX-XI
* В – весенний сезон; (3) – продолжительность сезона 3 месяца; V-VII – границы сезона: май – июль.			

Таблица 2.2

**Примерные сроки и продолжительность
основных гидрологических сезонов
для Азиатской территории России и прилегающих территорий**

Район	Название сезона и число месяцев в сезоне (числитель); границы сезона (знаменатель)		
Северная часть Сибири до р. Лены (севернее 64° на западе и 56° у оз. Байкал)	<u>В (2)</u> V-VI	<u>Л-О (4)</u> VII-X	<u>З (6)</u> XI-IV
Западная Сибирь (южнее 64°–60°)	<u>В (3)</u> IV-VI	<u>Л-О (5)</u> VII-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Центральный и Северный Казахстан	<u>В (2)</u> IV-V	<u>Л-О (6)</u> VI-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Горный Алтай	<u>В-Л (6)</u> IV-IX	<u>О (2)</u> X-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Забайкалье	<u>В (2)</u> IV-V	<u>Л-О (5)</u> VI-X	<u>З (5)</u> XI-III
Прибайкалье	<u>В-Л (5)</u> IV-VIII	<u>О (2)</u> IX-X	<u>З (5)</u> XI-III
Северо-Восточная Сибирь (восточнее р. Лены)	<u>В-Л (4)</u> V-VIII	<u>О (2)</u> IX-X	<u>З (6)</u> XI-IV
Дальний Восток (бассейн р. Амура)	<u>В-Л (6)</u> IV-IX	<u>О (2)</u> X-XI	<u>З (4)</u> XII-III
Горные районы Кавказа и Средней Азии	<u>В (4)</u> III-VI	<u>Л-О (5)</u> VII-XI	<u>З (3)</u> XII-II
Высокогорные районы Кавказа и Средней Азии	<u>В (2)</u> III-IV	<u>Л (5)</u> V-IX	<u>О-З (5)</u> X-II

Как видно из таблиц, продолжительность отдельных сезонов в разных географических зонах может составлять от 2 до 7 месяцев.

На следующем этапе расчета для каждого водохозяйственного года вычисляется сумма месячных расходов за год – $\sum Q_{\text{г}}$, лимитирующий период – $\sum Q_{\text{лп}}$ и лимитирующий сезон – $\sum Q_{\text{лс}}$ (табл.2.3).

Затем составляется таблица ранжированных сумм месячных расходов для водохозяйственного года, лимитирующего периода и лимитирующего сезона с указанием конкретных водохозяйственных лет, когда та или иная сумма расходов была зарегистрирована (табл.2.4).

Для каждого значения ранжированного ряда определяется эмпирическая обеспеченность, которая рассчитывается по формуле

$$p = \frac{m}{n+1} 100\%, \quad (2.49)$$

где m – порядковый номер суммы расходов в ранжированном ряду (ранжирование осуществляется в порядке убывания); n – длина ряда.

Таким образом, получают эмпирические кривые обеспеченности для сумм расходов за водохозяйственный (в/х) год, лимитирующий период и лимитирующий сезон.

По табл. 2.4 выбирается конкретный год, для которого обеспеченности сумм расходов за в/х год, лимитирующий период и лимитирующий сезон мало различаются между собой и близки к расчетной обеспеченности. Если, например, в качестве расчетной обеспеченности принять $p = 80\%$, то наиболее подходящим в данном случае будет 1975–1976 водохозяйственный год. Для этого года обеспеченность сумм расходов за в/х год, лимитирующий период и лимитирующий сезон соответственно равны 81.3%, 87.5% и 87.5%. Этот год и используется в качестве модели для расчета внутригодового распределения стока.

Таблица 2.3

Расчет месячных сумм расходов за водохозяйственный год,
лимитирующий период и лимитирующий сезон для р. Луги – ст. Толмачево

Год	Нелимитирующий период			ЛИМИТИРУЮЩИЙ ПЕРИОД												ΣQ_r	$\Sigma Q_{\text{ли}}$	$\Sigma Q_{\text{лс}}$
	период			нелимитирующий сезон									лимитирующий сезон					
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III						
1971-72	234	70.2	29.8	18.8	12.7	12.5	15.3	16.7	15.0	12.0	11.0	14.8	462.8	128.8	52.8			
1972-73	99.6	52.2	18.4	9.60	7.60	8.30	11.8	13.1	14.9	9.10	8.20	13.3	266.1	95.9	45.5			
1973-74	36.0	27.6	12.9	8.20	7.10	10.0	13.4	17.7	16.4	16.8	15.3	16.1	197.5	121.0	64.6			
1974-75	66.6	76.7	37.2	35.8	79.3	31.4	29.0	55.5	59.6	91.0	44.2	50.7	657.0	476.5	245.5			
1975-76	162	44.2	18.2	13.1	11.5	9.70	12.3	11.9	12.9	14.3	12.3	12.6	335.0	110.6	52.1			
1976-77	103	93.3	37.6	36.3	18.2	19.6	17.2	21.0	28.0	18.2	13.1	17.9	423.4	189.5	77.2			
1977-78	150	80.0	22.1	15.0	17.0	14.2	26.8	43.6	32.0	16.9	14.1	21.3	453.0	200.9	84.3			
1978-79	166	65.2	18.8	22.6	34.8	51.2	46.8	60.0	45.8	20.9	18.1	19.7	569.9	319.9	104.5			
1979-80	118	107	18.7	16.0	18.4	18.8	20.4	23.3	43.2	19.7	16.5	16.4	436.4	192.7	95.8			
1980-81	98.3	105	22.4	18.8	21.7	24.4	30.3	52.6	58.6	39.1	25.9	27.8	524.9	299.2	151.4			
1981-82	150	81.7	36.0	22.6	16.9	22.4	41.3	77.4	55.6	38.6	30.0	36.8	609.3	341.6	161.0			
1982-83	230	77.2	28.2	25.5	17.9	21.9	32.4	66.5	50.9	53.3	45.3	34.1	683.2	347.8	183.6			
1983-84	194	55.6	32.6	20.5	17.2	15.4	21.4	33.2	36.9	54.8	34.2	26.7	542.5	260.3	152.6			
1984-85	210	59.2	25.6	16.8	14.4	20.5	39.2	50.5	32.4	19.3	15.6	18.4	521.9	227.1	85.7			
1985-86	107	131	36.4	27.4	22.7	27.6	50.7	70.3	36.4	28.6	24.1	24.8	587.0	312.6	113.9			

Таблица 2.4

**Ранжированные суммы месячных расходов
за водохозяйственный год, лимитирующий период
и лимитирующий сезон для р. Луги – ст. Толмачево**

№ п/п	$P, \%$	ΣQ_r	год	$\Sigma Q_{лп}$	год	$\Sigma Q_{лс}$	год
1	6.3	683.2	1982-83	476.5	1974-75	245.5	1974-75
2	12.5	657.0	1974-75	347.8	1982-83	183.6	1982-83
3	18.8	609.3	1981-82	341.6	1981-82	161.0	1981-82
4	25.0	587.0	1985-86	319.9	1978-79	152.6	1983-84
5	31.3	569.9	1978-79	312.6	1985-86	151.4	1980-81
6	37.5	542.5	1983-84	299.2	1980-81	113.9	1985-86
7	43.8	524.9	1980-81	260.3	1983-84	104.5	1978-79
8	50.0	521.9	1984-85	227.1	1984-85	95.8	1979-80
9	56.3	462.8	1971-72	200.9	1977-78	85.7	1984-85
10	62.5	453.0	1977-78	192.7	1979-80	84.3	1977-78
11	68.8	436.4	1979-80	189.5	1976-77	77.2	1976-77
12	75.0	423.4	1976-77	128.8	1971-72	64.6	1973-74
13	81.3	335.0	1975-76	121.0	1973-74	52.8	1971-72
14	87.5	266.1	1972-73	110.6	1975-76	52.1	1975-76
15	93.8	197.5	1973-74	95.9	1972-73	45.5	1972-73

Для более объективного выбора расчетного года можно воспользоваться следующим критерием:

$$S_p = (p_r - p_{расч})^2 + (p_{лп} - p_{расч})^2 + (p_{лс} - p_{расч})^2, \quad (2.50)$$

где $p_{расч}$ – расчетная обеспеченность; $p_r, p_{лп}, p_{лс}$ – эмпирические обеспеченности сумм расходов соответственно за год,

лимитирующий период и лимитирующий сезон в конкретном водохозяйственном году. В качестве расчетного принимается год, для которого S_p является минимальным.

Среднемесячные расходы выбранного года-модели выражаются в процентах от суммы месячных расходов за весь водохозяйственный год ($\sum Q_r$):

$$R_i = \frac{Q_i}{\sum Q_r} 100 \%, \quad (2.51)$$

где Q_i – среднемесячный расход i -го месяца года-модели.

Окончательно расчет внутригодового распределения стока (табл.2.5) производится с использованием формулы

$$Q_{i,p\%} = \frac{R_i (\sum Q_r)_{p\%}}{100}, \quad (2.52)$$

где $Q_{i,p\%}$ – среднемесячный расход i -того месяца для года расчетной обеспеченности; $(\sum Q_r)_{p\%}$ – сумма месячных расходов за в/х год расчетной обеспеченности.

Значение $(\sum Q_r)_{p\%}$ определяется по аналитической кривой обеспеченностей годовых сумм расходов (в примере $(\sum Q_r)_{80\%} = 390$). Если кривая обеспеченностей строилась для среднегодовых расходов, то расчетное значение суммы месячных расходов за год можно определить по формуле

$$(\sum Q_r)_{p\%} = 12 (Q_r)_{p\%}, \quad (2.53)$$

где $(Q_r)_{p\%}$ – среднегодовой расход расчетной обеспеченности.

Метод реального года можно применять и при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. В этом случае весь расчет ведется по данным реки-аналога за исключением последнего этапа. При расчете по формулам (2.52) и (2.53) в качестве $(Q_r)_{p\%}$ используется среднегодовой расход p %-ной обеспеченности

Таблица 2.5

Расчет среднемесячных расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) для года 80%-ной обеспеченности
по модели реального водохозяйственного года (1975 – 1976) для р. Луги – ст. Толмачево

Характери- стика в/х года	Нелимитирующий период	ЛИМИТИРУЮЩИЙ ПЕРИОД												Сумма за год
		нелимитирующий сезон						лимитирующий сезон						
		IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III	
Год-модель 1975-1976	162	44.2	18.2	13.1	11.5	9.70	12.3	11.9	12.9	14.3	12.3	12.6	335	
R_p , %	48.4	13.2	5.4	3.9	3.4	2.9	3.7	3.6	3.9	4.3	3.7	3.8	100 %	
Расчетный год, $p = 80 \%$	189	51.5	21.2	15.3	13.4	11.3	14.3	13.9	15.0	16.6	14.3	14.7	390	

расчетной реки, полученный по методике, которая применяется при отсутствии данных гидрометрических наблюдений (см. 2.6.1).

2.10. Расчет стока наносов

Данные о стоке наносов необходимы при проектировании водохранилищ в целях расчета их заиления и возможной потери полезной емкости. На судоходных реках большое количество наносов вызывает изменение судоходных глубин, причем нередко в весьма малые сроки. При мелиоративных работах (орошение или осушение) сведения о наносах необходимы для оценки возможного заиления или размыва (при неправильном выборе скоростей воды) каналов. При проектировании противоэрозионных мероприятий требуются данные о смыве почвы со склонов в период половодья или паводков, что можно определить по количеству наносов в руслах рек. От количества наносов зависит положение оголовка водозаборных сооружений, поскольку они не должны заноситься.

Прежде чем осуществлять расчет стока наносов, необходимо произвести оценку надежности имеющихся данных (насколько полно учитывается сток наносов в каждом году). Для этого определяется степень полноты учета стока наносов в период половодья и паводков. Частота измерений наносов должна обеспечивать учет всех изменений мутности воды, особенно в многоводные фазы стока воды. На малых реках необходимо учитывать внутрисуточные, а на средних и больших – ежесуточные колебания мутности воды в периоды половодья и паводков. При этом наблюдениями за стоком наносов должен быть охвачен весь поток, включая пойму и протоки.

Одновременно выясняется наличие на реке выше створа сооружений, влияющих на режим стока наносов, а также хозяйственных мероприятий в бассейне реки, влияющих на эрозионные процессы на водосборе.

Для выявления пробелов в учете стока наносов и оценки надежности их значений строится комплексный хронологический график хода расходов воды, мутности воды, расходов наносов, осадков, температуры воздуха и почвы. График строится для каждого створа. Сопоставление хода изменения во времени этих элементов позволяет выявить пробелы или допущенные ошибки в измерениях и подсчетах стока наносов. Если на одной реке имеются два и более створа с измерениями наносов, то производится сопоставление хронологического хода расходов воды, наносов и мутности воды в течение года.

Для анализа многолетнего ряда наблюдений за стоком наносов используются графики связи среднегодовых расходов наносов и расходов воды, т. е. $Q_s = f(Q)$, помогающие выявить изменение естественного режима наносов под влиянием хозяйственной деятельности.

При анализе данных о стоке наносов горных рек надо учитывать возможность резкого их возрастания при прохождении в бассейне реки селевых паводков.

Период наблюдений за стоком наносов считается репрезентативным, если его длительность превышает 15 – 20 лет, а на графике $Q_s = f(Q)$ точки располагаются достаточно равномерно и тесно.

При достаточном (репрезентативном) ряде наблюдений расходы взвешенных наносов расчетной обеспеченности рассчитываются по методике, изложенной в 2.3.1.

При недостаточном периоде наблюдений статистические характеристики расходов взвешенных наносов определяются следующим образом.

Норма расхода наносов устанавливается по связи с нормой расхода воды

$$\bar{Q}_s = \frac{Q_s \bar{Q}}{\bar{Q}}, \quad (2.54)$$

где $\bar{Q}_s$ и $\bar{Q}$ – соответственно норма расхода наносов и расхода воды; Q_s и Q – расходы наносов и воды средние за период одновременных наблюдений в расчетном створе.

Коэффициент вариации расходов взвешенных наносов оценивается по рекам-аналогам.

Отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации принимается равным 2.

В случаях отсутствия данных гидрометрических наблюдений за стоком наносов расчеты производятся либо по региональным зависимостям расхода наносов от основных определяющих его факторов, либо с использованием данных о мутности рек.

По данным исследований ГГИ к числу основных факторов, от которых зависит средний многолетний модуль взвешенных наносов, относятся: средний многолетний модуль стока воды, уклон русла реки, площадь водосбора; средняя высота водосбора (в горных районах).

Расчет нормы стока наносов через среднюю мутность воды производится по формуле

$$\bar{Q}_s = 10^{-3} \bar{S} \bar{Q}, \quad (2.55)$$

где $\bar{S}$ – средняя многолетняя (норма) мутность воды, г/м³; $\bar{Q}$ – норма расхода воды, определяемая по методике, изложенной в 2.5.1.

Для определения средней многолетней мутности воды средних рек России можно использовать карту, разработанную в 1972 г. в ГГИ.

Карты мутности имеют меньшую точность, чем карты стока воды. Это обусловлено тем, что мутность воды измеряется с меньшей точностью, чем расход воды. К тому же количество пунктов измерения мутности и период наблюдения на них существенно меньше. Использование на картах зон мутности вместо изолиний стока наносов также снижает точность карт.

Мутность воды малых рек больше, чем средних и больших. Поэтому при пользовании картой необходимо вводить поправку для малых рек:

$$\bar{S}_m = k\bar{S}, \quad (2.56)$$

где $\bar{S}_m$ – норма мутности воды малой реки; $\bar{S}$ норма мутности, определенная по карте; k – районный коэффициент, зависящий от площади водосбора.

Коэффициент вариации и отношение C_s/C_v при отсутствии данных гидрометрических наблюдений за взвешенными наносами определяются так же, как и при недостаточном периоде наблюдений (см. выше).

Влекомые наносы составляют небольшую часть общего количества наносов (порядка 10 – 15%), но они также должны учитываться, чтобы определить общее количество наносов в данном водотоке. Следовательно, суммарный сток твердых наносов состоит из стока взвешенных и влекомых наносов.

При периоде наблюдений за стоком влекомых наносов более 10 лет строятся графические связи измеренных влекомых наносов со среднесуточными расходами воды. Такие связи позволяют по расходу воды расчетной обеспеченности определить соответствующий расход влекомых наносов.

При недостаточном периоде наблюдений или отсутствии данных сток влекомых наносов рассчитывается в зависимости от гранулометрического состава донных отложений. Методика такого расчета излагается в курсах по русловым процессам и динамике речных потоков.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Цели и задачи гидрологических расчетов.
2. Перечислите основные гидрометеорологические характеристики, используемые в инженерных гидрологических расчетах.

3. Как производится расчет гидрологических характеристик при наличии длинного ряда гидрометрических наблюдений?
4. Как производится расчет гидрологических характеристик при наличии короткого ряда гидрометрических наблюдений?
5. Какие методы используются для расчета гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?
6. Как и с какой целью строятся разностные интегральные кривые речного стока?
7. Что называется нормой годового стока? В каких единицах она может быть выражена?
8. Как производится расчет нормы годового стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?
9. Как производится расчет среднегодовых расходов воды различной обеспеченности при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?
10. Какие типы формул используются при расчете максимальных расходов воды половодий и паводков?
11. Как производится расчет максимальных расходов воды весеннего половодья при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?
12. Как производится расчет максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на средних и малых реках?
13. Какие расчетные характеристики минимального стока наиболее часто используются в практике гидрологических расчетов?
14. Как производится расчет минимального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений на средних и малых реках?
15. Как производится разбивка года на сезоны и периоды при расчете внутригодового распределения стока?
16. Как производится расчет внутригодового распределение стока методом реального года?

17. В каких случаях и для каких отраслей хозяйства необходимы сведения о стоке наносов?
18. Как производится расчет стока взвешенных и влекомых наносов при отсутствии данных гидрометрических наблюдений?

3. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ

Гидрологический прогноз представляет собой научно обоснованное предсказание характеристик режима водного объекта. Каждый гидрологический прогноз должен иметь определенную заблаговременность, под которой понимается промежуток времени от даты составления прогноза до даты наступления или окончания прогнозируемого явления.

Как все природные явления, гидрологические процессы подчиняются в своем развитии общим законам физики. Эти законы составляют основу методов прогнозирования. Явления, связанные с переходом воды из одного агрегатного состояния в другое (образование льда на водных объектах, таяние льда и снега, испарение), определяются процессами теплообмена. Все явления, связанные со стоком воды по поверхности склонов, в руслах рек и в толще почво-грунтов, подчиняются законам гидродинамики.

В тоже время гидрологические явления формируются в неоднородных и чрезвычайно многообразных условиях географической среды и представляют собой следствие комплекса сложных природных взаимодействий. В таких условиях учесть абсолютно все факторы, влияющие на формирование гидрологического режима водных объектов, практически невозможно, поэтому все существующие методы гидрологических прогнозов являются приближенными.

3.1. Классификация и виды гидрологических прогнозов

В основу классификации существующих гидрологических прогнозов могут быть положены четыре основных признака:

1. Заблаговременность прогнозов;
2. Предсказываемые явления и элементы режима;

3. Методы прогнозирования;
4. Целевое назначение прогнозов.

Классификация прогнозов по заблаговременности

По признаку заблаговременности гидрологические прогнозы делятся на:

- долгосрочные;
- краткосрочные;
- экстренные предупреждения об опасных явлениях.

К категории краткосрочных прогнозов принято относить прогнозы, заблаговременность которых не превышает 10–15 суток.

Классификация прогнозов в зависимости от предсказываемых явлений

В зависимости от предсказываемых явлений все гидрологические прогнозы делятся на:

- прогнозы элементов водного режима (водные прогнозы);
- прогнозы элементов ледового режима (ледовые прогнозы).

Основными элементами *водного режима*, прогноз которых представляет наибольший интерес, являются:

- объем стока или средние расходы воды за различные интервалы времени (за половодье, паводок, межень, сезон, декаду, месяц, квартал и др.);
- максимальный уровень (расход) половодья или паводков и время их наступления;
- распределение стока половодья или паводка во времени;
- максимальный уровень наполнения озер и время его наступления;
- уровни воды судоходных рек;
- высота ветровых волн на озерах и водохранилищах.

Основными элементами *ледового режима* являются:

- даты появления плавучего льда;
- даты ледостава;
- толщина льда;

- даты вскрытия;
- даты очищения ото льда озер и водохранилищ.

Классификация прогнозов в зависимости от методов прогнозирования

Применяемые в настоящее время методы прогнозов можно разделить на четыре основных группы.

- Методы, вытекающие из законов движения воды в руслах. К ним относятся методы гидродинамики и все приближенные способы расчета движения и трансформации паводков в русловой сети. Эти методы составляют основу для краткосрочных прогнозов расходов и уровней воды.
- Методы, вытекающие из анализа гидрологических и метеорологических процессов, происходящих в речных бассейнах. К ним относятся воднобалансовые методы прогноза объема стока половодья и паводков, методы расчета гидрографа паводков и др.
- Методы, вытекающие из анализа процессов теплообмена, происходящих на реках, озерах и водохранилищах под влиянием гидрометеорологических факторов. Эти методы являются основой для краткосрочных прогнозов замерзания и вскрытия рек, нарастания и стаивания льда.
- Методы, вытекающие из анализа процессов атмосферной циркуляции. Такого рода методы применяются, например, в долгосрочных ледовых прогнозах.

Классификация прогнозов по целевому назначению

По целевому назначению все гидрологические прогнозы можно разделить на:

- прогнозы общего пользования;
- специализированные прогнозы для различных отраслей хозяйства, ведомств и корпораций.

К первой группе относятся прогнозы, представляющие общий интерес, например прогнозы максимального уровня половодья и паводков, предупреждения о наводнениях и т. п.

Специализированные прогнозы учитывают специфику задач, стоящих перед тем или иным ведомством или корпорацией.

Каждая из приведенных классификаций имеет свои преимущества и недостатки. Однако в совокупности они дают достаточно полное представление о методах и видах прогнозов.

3.2. Оценка методов и оправдываемости гидрологических прогнозов

Оценка прогнозов преследует две цели:

1. Установить степень точности и эффективности методики прогнозирования гидрологической характеристики;
2. Оценить точность конкретных прогнозов на основе сравнения фактических и прогнозных значений исследуемой гидрологической характеристики.

Первая оценка необходима для решения вопроса о целесообразности практического применения той или иной методики прогнозирования, вторая – для оценки успешности работы органов службы гидрологических прогнозов.

При проверке надежности методики формируется ряд значений Δ_i . Разность Δ_i представляет собой изменение предсказываемой переменной за период заблаговременности. Значения Δ_i рассчитывают по фактическим данным за весь имеющийся период наблюдений. В качестве числовой оценки эффективности методики прогнозирования используется отношение

$$S/\sigma_{\Delta}, \quad (3.1)$$

где S – среднеквадратическая ошибка поверочных прогнозов; σ_{Δ} – среднеквадратическое отклонение переменной Δ_i . Значения S и σ_{Δ} рассчитываются по формулам:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - y_i^*)^2}{n}}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{n-1}}, \quad (3.3)$$

где y_i – фактическое значение гидрологической характеристики; y_i^* – ее прогностическое значение; $\bar{\Delta}$ – среднее значение переменной Δ_i ; n – длина ряда.

Очевидно, что отношение (3.1) должно быть меньше единицы, то есть среднеквадратическая ошибка прогноза должна быть меньше, чем среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины за период заблаговременности. В противном случае прогнозы теряют всякий смысл. На практике методика считается эффективной если:

$$S/\sigma_{\Delta} \leq 0.70 \quad \text{при} \quad n < 15,$$

$$S/\sigma_{\Delta} \leq 0.75 \quad \text{при} \quad 15 \leq n < 25, \quad (3.4)$$

$$S/\sigma_{\Delta} \leq 0.80 \quad \text{при} \quad n \geq 25$$

При оценке краткосрочных прогнозов за допустимую ошибку принимается величина

$$\Delta_{\text{доп}} = 0.674 \sigma_{\Delta}. \quad (3.5)$$

При оценке долгосрочных прогнозов используется другая формула:

$$\Delta_{\text{доп}} = 0.674 \sigma, \quad (3.6)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение прогнозируемой величины (стандартное отклонение).

Оправдываемость совокупности прогнозов рассчитывается как отношение числа прогнозов с ошибками, не превышающими допустимую, к общему числу прогнозов и выражается в процентах.

3.3. Краткосрочные прогнозы расходов и уровней рек

Краткосрочные прогнозы уровней и расходов воды имеют важное значение для предупреждения об угрозе наводнений, а также для судоходства и водного хозяйства.

В данном разделе рассматриваются простейшие методы краткосрочных прогнозов, использование которых возможно при ограниченности исходной гидрометеорологической информации.

3.3.1. Метод тенденции

В основе метода лежит экстраполяция хода уровней или расходов воды на некоторый интервал времени вперед за счет свойства гидрологических явлений сохранять в течение некоторого времени одну и ту же тенденцию развития. Это свойство присуще прежде всего крупным рекам, на которых отмечаются продолжительные периоды плавного подъема и плавного спада расходов и уровней.

Способы прогноза по методу линейной тенденции подразделяют на две группы: 1 – прогноз по линейной тенденции; 2 – прогноз по нелинейной тенденции.

Метод линейной тенденции

Экстраполяция расходов и уровней при использовании метода линейной тенденции осуществляется по формуле

$$D = \alpha \Delta_1, \quad (3.7)$$

где Δ_1 – изменение уровня (расхода воды) за короткий интервал времени Δt_1 ; D – изменение уровня (расхода воды) за более длительный интервал времени $(\Delta t_1 + \Delta t_2)$; α – коэффициент линейной зависимости. Очевидно, что Δt_2 – представляет собой заблаговременность прогноза (рис. 3.1).

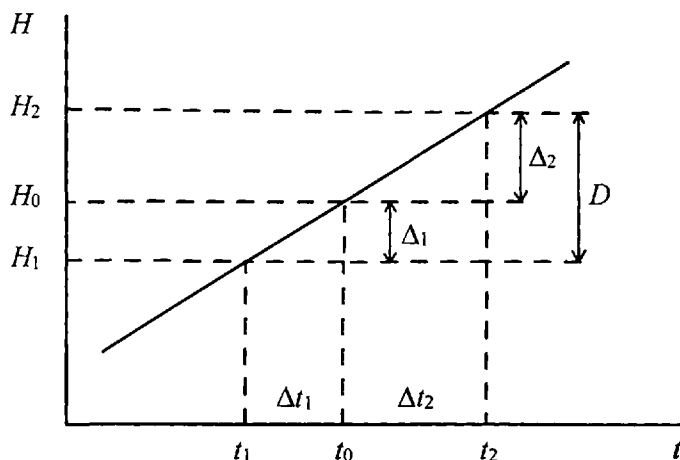


Рис. 3.1. Изменение уровня воды во времени на интервале от t_1 до t_2 ; t_0 – дата выпуска прогноза.

Для того чтобы выражение (3.7) использовать для практических расчетов необходимо по данным предшествующих наблюдений построить линейную зависимость $D = f(\Delta)$ и определить коэффициент α .

Метод используется для прогнозов с небольшой заблаговременностью (1–3 суток). Достаточно типичной является заблаговременность двое суток ($\Delta t_2 = 2$). В этом случае $\Delta t_1 = 1$, а $D = 3$ суток.

Метод нелинейной тенденции

При заблаговременности прогноза более 3 суток зависимость (3.7) становится нелинейной, а ее вид зависит от фазы водности. Метод нелинейной тенденции позволяет давать прогнозы с заблаговременностью до 10 – 15 суток, однако его можно применять только в том случае, если естественный ход уровней (расходов) не искажается за счет дополнительного притока, вызванного паводками, прошедшими на интервале заблаговременности прогноза.

Чаще всего метод нелинейной тенденции применяется при прогнозе расходов и уровней на спаде половодий и паводков. В этом случае истощение запасов воды в бассейне описывается достаточно простыми дифференциальными уравнениями, решение которых приводит к выражениям вида

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}, \quad (3.8)$$

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \beta t)^2}, \quad (3.9)$$

где Q_0 – расход воды в начальный момент спада (при $t = 0$); Q_t – расход воды в момент t ; α и β – параметры. Выражения (3.8) и (3.9) описывают неискаженные кривые спада половодий и паводков. Значения параметров α и β определяют по данным предшествующих наблюдений. Для улучшения качества прогнозов параметры α и β могут изменяться в зависимости от водности половодья или паводка.

А. В. Огиевский предлагал использовать несколько типовых кривых спада в зависимости от максимального паводочного расхода. К. П. Воскресенский предложил строить среднюю многолетнюю кривую спада по ежегодным кривым, выражая расход воды в долях от максимального расхода данного года, а время – в долях от продолжительности спада.

3.3.2. Метод соответственных уровней

Прогноз расходов воды в нижнем створе участка реки сводится к решению уравнения

$$Q_n(t) = Q_v(t - \tau) + \int_0^L q(L) dL, \quad (3.10)$$

где $Q_n(t)$ – расход воды в нижнем створе в момент времени t ; $Q_v(t - \tau)$ – расход воды в верхнем створе в момент времени $t - \tau$ (τ – время добегания между створами); L – длина участка; q – приток воды на единицу длины участка.

На практике метод чаще используется применительно к прогнозу уровней. В этом случае прогностическая зависимость для бесприточного участка имеет вид

$$H_n(t) = f[H_v(t - \tau)]. \quad (3.11)$$

Зависимость (3.11) может быть как линейной, так и нелинейной; кроме того, часто удается добиться улучшения зависимости за счет введения в расчетную формулу дополнительных параметров. Наиболее часто в качестве дополнительного параметра используется продольный уклон свободной поверхности на участке в момент времени $(t - \tau)$.

Значения параметров прогностических зависимостей вычисляются по данным предшествующих наблюдений на основе статистического анализа.

Заблаговременность прогноза определяется временем добегания на участке (τ). Значение τ устанавливается по совмещенным графикам колебания уровня воды в двух створах как разница во времени наступления соответственных уровней (рис.3.2). При этом ориентируются, как правило, на точки экстремумов.

Время добегания на конкретном участке реки не является константой и зависит от уровня воды, уклона водной поверхности, формы поперечного сечения, шероховатости русла и т. д. Поэтому в дополнение к зависимости (3.11) строится зависимость времени добегания от перечисленных факторов. В простейшем случае зависимость имеет вид

$$\tau = f(H, I), \quad (3.12)$$

где H – уровень воды (в верхнем или нижнем створе) на момент выпуска прогноза; I – уклон водной поверхности на момент выпуска прогноза.

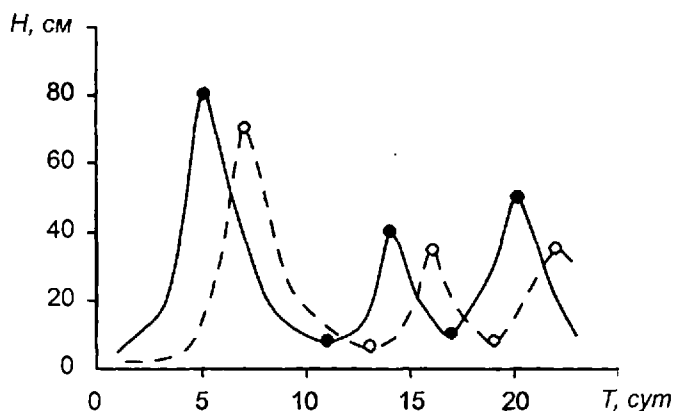


Рис. 3.2. Совмещенные графики колебания уровня на двух постах с разметкой соответственных уровней

Для приточного участка прогностическая зависимость имеет вид

$$H_n(t) = f[B_1(t - \tau_1), B_2(t - \tau_2), \dots, B_k(t - \tau_k)], \quad (3.13)$$

где $B_1, B_2, \dots, B_k$ – уровни воды соответственно в створе главной реки и притоков в моменты времени $(t - \tau_1), (t - \tau_2), \dots, (t - \tau_k)$; $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k$ – время добегаия от верхних створов.

Заблаговременность прогноза здесь определяется наименьшим временем добегаия. Определение расчетного времени добегаия производится по средней скорости движения паводков на бесприточных участках.

Рассмотрим пример определения времени добегаия на участке с одним притоком (рис. 3.3).

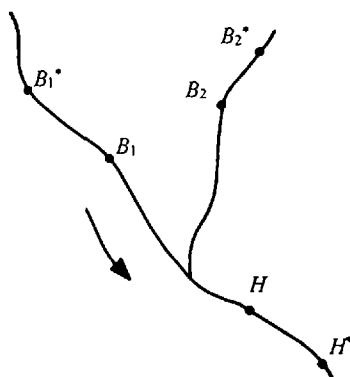


Рис. 3.3. Схема приточного участка реки

Необходимо определить время добегаия от створов B_1 и B_2 до нижнего створа H . Для этого выберем промежуточные бесприточные участки $[B_1^*, B_1]$, $[B_2^*, B_2]$, $[H, H^*]$ и для каждого из них определим время добегаия по соответственным уровням.

Зная время добегаия и длину каждого участка, определяем средние скорости движения паводков на этих участках. Обозначим среднюю скорость движения паводка на участке $[B_1^*, B_1]$ – V_1 , на участке $[B_2^*, B_2]$ – V_2 и на участке $[H, H^*]$ – V_0 .

Затем определяется средняя скорость движения паводков на участках $[B_1, H]$ и $[B_2, H]$:

$$\bar{V}_{B1-H} = \frac{V_1 + V_0}{2}; \quad \bar{V}_{B2-H} = \frac{V_2 + V_0}{2}; \quad (3.14)$$

Время добегания от верхних створов главной реки и притока определяется по формулам

$$\tau_{B1-H} = \frac{L_{B1-H}}{\bar{V}_{B1-H}}; \quad \tau_{B2-H} = \frac{L_{B2-H}}{\bar{V}_{B2-H}}, \quad (3.15)$$

где L_{B1-H} и L_{B2-H} – расстояния от расчетного створа H до створов B_1 и B_2 .

3.3.3. Прогноз стока по данным о запасах воды в русловой сети

Прогноз средних расходов за относительно короткие интервалы времени основываются на использовании зависимости стока от запасов воды в русловой сети

$$\bar{Q}_{t+\tau} = f(W_t), \quad (3.16)$$

где W_t – запасы воды в той части русловой сети, с которой вода достигает замыкающего створа за интервал времени от t до $t + \tau$.

Например, при отсутствии дополнительного притока средний декадный расход в заданном створе целиком определяется объемом воды, находящейся в руслах той части бассейна реки, время добегания с которой составляет 10 суток, т. е.

$$\bar{Q}_{t+10} = f(W_t). \quad (3.17)$$

В первом приближении объем воды на участке между двумя гидрометрическими створами равен произведению среднего расхода на время добегания

$$W_{1-2} = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \tau, \quad (3.18)$$

где Q_1 и Q_2 – расходы соответственно на верхнем и нижнем постах.

Для участка, на котором впадает крупный приток (рис.3.4), объем воды вычисляется по формуле

$$W_{4-2-3} = \frac{Q_4 + Q_2 + Q_3}{2} \bar{\tau}, \quad (3.19)$$

где $\bar{\tau}$ – среднее время добегания между створами 2 – 4 и 3 – 4;
 Q_4 – расход в нижнем створе.

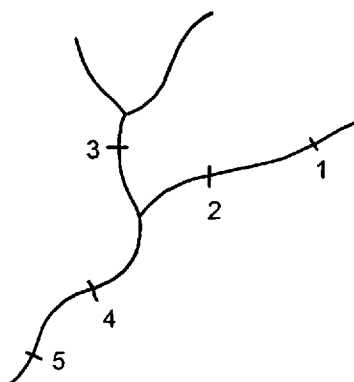


Рис.3.4. Схема размещения постов на участке с одним крупным притоком.

В общем случае при наличии нескольких притоков формула для расчета объема воды в русловой сети имеет вид

$$W_t = \frac{Q_H + \sum Q_B}{2} \bar{\tau} k, \quad (3.20)$$

где Q_H – расход воды в нижнем створе; $\sum Q_B$ – сумма расходов воды в верхних створах; $\bar{\tau}$ – среднее время добегания до нижнего створа; k – коэффициент размерности; если расход выражен в $\text{м}^3/\text{с}$, а объем в м^3 , то $k = 86400$ (число секунд в сутках).

Для более надежного определения запасов воды в русловой сети расчетный участок реки разбивают на несколько более мелких с временем добегания 2 – 5 суток. На каждом участке производится расчет объемов по формуле (3.20), затем эти объемы суммируются.

При выводе прогностической зависимости (3.16) используются данные о расходах за прошлые годы. По этим данным описанным выше способом вычисляются запасы воды на определенные календарные даты и соответствующие им средние расходы за период, равный времени добегания. Например, если время добегания составляет 10 суток, то запасу воды, вычисленному, скажем, на 30.06, должен соответствовать средний расход за период с 01.07 по 10.07, запасу воды на 10.07 – средний расход с 11.07 по 20.07 и т. д. Пример такой зависимости представлен на *рис.3.5*.

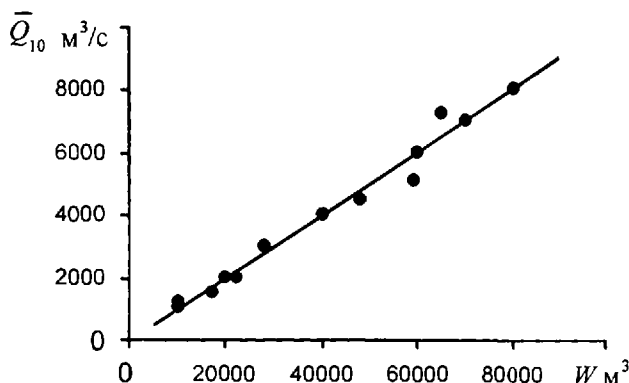


Рис. 3.5. Пример зависимости средних декадных расходов крупной реки от запасов воды в русловой сети на начало декады

Методика прогнозов стока по данным о русловых запасах наиболее эффективна для крупных рек, основной сток которых формируется в верхней, значительно удаленной от замыкающего створа, части бассейна. Для успешного ее применения необходима хорошо развитая гидрометрическая сеть.

3.4. Краткосрочные прогнозы ледовых явлений

Зимой подавляющее большинство рек России покрывается льдом. Продолжительность периода ледостава и толщина льда зависят от климатических условий, но не остаются постоянными от года к году. Амплитуды колебаний сроков замерзания и вскрытия рек нередко достигают 30 – 50 дней, а в некоторых южных районах ледостав на реках образуется не каждый год. Столь значительные колебания сроков замерзания и вскрытия рек существенно влияют на продолжительность навигации. В связи с этим ледовые прогнозы представляют особый интерес для водного транспорта. Кроме того, прогнозы ледовых явлений важны для рек, на которых наблюдаются заторные явления. Заторы льда вызывают наводнения и причиняют значительный ущерб. Заторы характерны для рек текущих с юга на север, где вскрытие происходит сверху вниз по течению реки.

В практике ледовых прогнозов применяются как эмпирические зависимости, так и более строгие методы, в основе которых лежит расчет теплового баланса поверхности воды и льда.

3.4.1. Характерные фазы ледообразования и вскрытия ледового покрова на реках, озерах и водохранилищах

Характерные фазы ледообразования

Полному замерзанию рек, озер и водохранилищ предшествуют определенные фазы ледообразования. Такими фазами являются образование заберегов, первичных форм плавучего льда и различной густоты ледоход.

Охлаждение воды до температуры замерзания в реках и водоемах происходит неравномерно. Раньше всего охлаждение происходит у берегов, где малая глубина и ослабленный водообмен. В результате – образуются забереги. По мере дальнейшего охлаждения воды забереги на больших реках расширяются, при этом начинается массовое образование кристаллов льда в самом потоке воды. Всплывая и смерзаясь, эти кристаллы образуют первичные формы плавучего льда: на спокойных равнинных реках – сало, на горных реках – шугу.

Замерзание малых и больших равнинных рек происходит по-разному. На малых реках со слабым течением ледостав образуется чаще всего путем смыкания быстро расширяющихся заберегов. Поэтому ледохода на них обычно не бывает. На больших реках, как правило, ледоставу предшествует более или менее длительный период осеннего ледохода, который сгущается по мере усиления мороза. На крутых поворотах реки и в местах сужения потока происходит остановка плывущего льда. В таких местах льдины смерзаются между собой и с подплывающими льдинами и ледостав распространяется вверх по течению. Ниже ледяной перемычки сохраняются довольно большие участки открытой воды.

Таким образом, ледостав на больших равнинных реках образуется участками, между которыми остаются полыньи, замерзающие значительно позже.

На горных и полугорных реках, благодаря большой транспортирующей способности потока, образуется громадное количество внутриводного льда. На таких реках ледоставу предшествует интенсивный шугоход. Ледостав на них также образуется путем остановки плавучего льда и распространяется вверх по течению.

Замерзание озер и водохранилищ начинается, как правило, с берегов, которые расширяются по мере усиления морозов. На больших озерах и водохранилищах важную роль в образовании ледостава играет плавучий лед и его дрейф под воздействием ветра.

Процесс разрушения ледяного покрова на реках и его фазы

Вскрытие рек происходит под воздействием двух факторов: теплового и механического. Под действием тепла происходит таяние и ослабление прочности ледяного покрова. Под действием механических сил потока происходит взлом, нарушение целостности ледяного покрова и его транспортирование вниз по течению. В зависимости от режима реки относительная роль этих факторов может быть различной.

Наиболее спокойно процесс разрушения ледового покрова происходит на тех реках, где половодье наблюдается после вскрытия. Такая ситуация характерна для низовий крупных рек текущих с севера на юг (Волга, Дон, Днепр и др.). Главным фактором в этом случае является тепловой. При этом количество тепла, необходимое для разрушения сплошного ледяного покрова, зависит от толщины самого льда.

Иной характер вскрытия наблюдается на других реках, особенно на реках, текущих с юга на север. Важную роль во вскрытии этих рек играет механический фактор, а именно волна половодья. Смещаясь вниз по течению, эта волна поднимает и взламывает лед, когда он еще обладает большой прочностью. Наличие ледяного покрова на ниже расположенном участке реки и большое количество прочного ледового материала нередко приводит к образованию мощных заторов.

Хотя в данном случае роль механического фактора в разрушении ледяного покрова достаточно велика, главным фактором все же остается тепловой, так как он в конечном счете определяет формирование волны половодья и сроки вскрытия реки.

Третьим фактором, влияющим на процесс вскрытия рек, является толщина самого льда. Чем толще лед, тем больше (при прочих равных условиях) необходимо тепла для того, чтобы произошло вскрытие.

Характерными фазами разрушения ледяного покрова на реках являются образование закраин, подвижки льда, его взлом на

большом протяжении и последующий ледоход, который завершается полным исчезновением льда.

Особенности вскрытия и очищения ото льда озер и водохранилищ

Вскрытие и очищение ото льда озер и водохранилищ происходит под воздействием главным образом притока тепла, хотя и в этом случае механическое воздействие ветра и подъем уровня воды играют заметную роль в ускорении процесса очищения ото льда.

Относительно малая роль механического фактора во вскрытии озер и водохранилищ приводит к тому, что исчезновение льда на них происходит намного позже, чем на соседних реках.

Характерными фазами разрушения ледяного покрова на озерах и водохранилищах являются его взлом, образование разводий и ветровой дрейф льда.

3.4.2. Прогноз даты появления льда

Использование эмпирических приемов при разработке краткосрочных прогнозов ледовых явлений возможно при наличии данных наблюдений за температурой воды, ледовыми явлениями и температурой воздуха за достаточно длительный период. Наличие таких данных позволяет установить зависимость между начальным теплозапасом и необходимой для появления льда потерей тепла.

В качестве косвенной характеристики начального теплозапаса принимается начальная температура воды (θ_0). При этом под начальной температурой воды понимается температура воды в день перехода температуры воздуха через ноль градусов к отрицательным значениям.

В качестве косвенной характеристики потери тепла используется сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха от момента перехода этой температуры через ноль градусов ($\sum -t$).

В простейшем случае прогностическая зависимость имеет вид:

$$\Sigma - t = f(\theta_0). \quad (3.21)$$

В качестве дополнительного фактора, влияющего на величину начального теплозапаса, используют глубину реки на дату выпуска прогноза (h):

$$\Sigma - t = f(\theta_0, h). \quad (3.22)$$

Используя краткосрочный прогноз температур воздуха устанавливают дату, к которой накапливается необходимая для появления льда сумма отрицательных температур ($\Sigma - t$). Эта дата и принимается за дату появления льда.

Более строгая методика прогноза базируется на использовании уравнения теплового баланса. Уравнение теплового баланса на поверхности раздела «вода – воздух» за произвольный отрезок времени в период охлаждения водотока можно представить в виде

$$\alpha(\theta - \theta_{\text{пов}}) + B = 0, \quad (3.23)$$

где α – коэффициент теплоотдачи водного потока, характеризующий интенсивность подачи тепла из водной массы к поверхности воды; θ – средняя температура водной массы; $\theta_{\text{пов}}$ – температура на поверхности воды; B – результирующая теплообмена на водной поверхности, которая определяется по формуле

$$B = R + LE + P, \quad (3.24)$$

Здесь $R = Q - I_s$, где Q – приток тепла прямой и рассеянной солнечной радиации; I_s – эффективное излучение; P – турбулентный теплообмен с атмосферой; LE – потеря или приход

тепла соответственно при испарении воды или конденсации атмосферной влаги на водной поверхности.

Выражение (3.23) справедливо до тех пор, пока температура поверхности воды положительная. С падением температуры до 0°C возникает дополнительный приток тепла за счет выделения удельной теплоты ледообразования. Появление льда возможно только с момента, когда температура поверхностного слоя воды снизится до точки замерзания ($\theta_{\text{пов}} = 0$), а теплоотдача водной поверхности останется больше притока тепла к ней из водной массы.

Таким образом, в основу прогноза ледообразования на поверхности воды положено неравенство

$$\theta_i \leq -\frac{B_i}{\alpha_i}, \quad (3.25)$$

индекс i показывает, что входящие в формулу (3.25) величины рассчитываются на конец i -го интервала времени.

Чтобы выяснить возможность появления льда на конец i -го интервала времени, необходимо вычислить значения θ_i , B_i , α_i и проверить знак неравенства.

Следует отметить, что при использовании данной методики для прогноза появления льда необходим краткосрочный прогноз температуры воздуха, скорости ветра и облачности, так как эти характеристики требуются для расчета θ_i , B_i и α_i .

3.4.3. Прогноз даты вскрытия рек

Простейшие приемы краткосрочных прогнозов вскрытия рек основываются на использовании эмпирических зависимостей вида

$$\sum q_0 = f(h_{\text{л}}), \quad (3.26, \text{a})$$

$$\sum q_0 = f(\sum t -), \quad (3.27,а)$$

где $(\sum q_0)$ – приток тепла, необходимый для вскрытия реки на заданном участке; $h_{\text{л}}$ – толщина льда; $(\sum t -)$ – сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха за период ледостава.

В качестве косвенной характеристики притока тепла часто используется сумма положительных среднесуточных (или дневных) температур воздуха. В этом случае зависимости (3.26,а), (3.27,а) принимают вид:

$$\sum t + = f(h_{\text{л}}), \quad (3.26,б)$$

$$\sum t + = f(\sum t -). \quad (3.27,б)$$

где $(\sum t +)$ – сумма положительных среднесуточных (или дневных) температур воздуха, необходимая для вскрытия реки на заданном участке. Зависимости вида (3.26,б – 3.27,б) строятся по данным наблюдений за предшествующие годы.

Рассмотрим порядок составления прогноза с использованием зависимости (3.26,б). Зная толщину льда, по графику связи определяем сумму положительных температур, необходимых для вскрытия реки. Имея прогноз температуры воздуха, определяем дату, к которой накопится необходимая сумма положительных температур. Эта дата и принимается за ожидаемую дату вскрытия реки.

Отдельное направление при расчете и прогнозе весенних ледовых явлений на реках и водохранилищах составляют методы, основанные на оценке прочности тающего ледяного покрова.

Разрушение ледяного покрова рек происходит, с одной стороны, вследствие потери прочности ледяного покрова и уменьшения его толщины, а с другой стороны, – под воздействием подъема уровня воды и увеличения скорости течения.

Условие начала разрушения ледяного покрова выражается следующим неравенством:

$$\varphi h_{\text{л}} \leq f(\Delta H, H). \quad (3.28)$$

Здесь $\varphi h_{\text{л}}$ – прочность ледяного покрова (φ – относительное разрушающее напряжение тающего льда на изгиб, $h_{\text{л}}$ – толщина льда); H – уровень воды перед началом таяния льда; ΔH – подъем воды в момент вскрытия над уровнем воды в начале таяния льда.

Таким образом, при разработке прогнозов вскрытия рек необходимо предвычислять прочность льда и ход уровня воды.

Относительное разрушающее напряжение льда на изгиб (кг/см^2) можно определить по формуле С.Н. Булатова

$$\varphi = \left(1 - \sqrt{\frac{S}{S_0}} \right)^2, \quad (3.29)$$

где S – удельное содержание жидкой фазы во льду; S_0 – предельное содержание жидкой фазы во льду (при которой наступает полная потеря прочности).

Среднее значение S_0 составляет 44 кал/см^3 . Величина S определяется исходя из уравнения теплового баланса ледяного покрова за период таяния.

За начало периода таяния принимается первый день после схода снега со льда. Наибольшая сложность заключается в определении величины S , так как возникает необходимость в использовании прогноза ряда метеорологических элементов, кроме того, необходима информация о радиационных свойствах льда.

По данным С.Н. Булатова, изложенный способ дает лучшие результаты при прогнозах вскрытия на тех реках, где процесс вскрытия определяется не только действием тепла, но и подъемом уровня.

3.4.4. Прогноз даты начала дрейфа льда на озерах и водохранилищах

Процесс разрушения ледяного покрова на озерах и водохранилищах существенно отличается от этого процесса на реках. На достаточно большом озере или водохранилище, прежде чем произойдет вскрытие, т. е. появятся разводья и начнется ветровой дрейф льда, ледяной покров довольно продолжительное время тает на месте под воздействием солнечной радиации и притока тепла за счет турбулентного теплообмена между поверхностью льда и атмосферой. В результате этих процессов прочность ледяного покрова снижается и создаются условия для его разрушения под действием механических факторов.

Основной силой, вызывающей разлом и нарушение целостности ледяного покрова достаточно больших озер и водохранилищ, является ветер. Ветер вызывает прогибы и растяжения (или сжатия) ледяного покрова. Считается, что разлом ледяного покрова чаще всего является следствием прогибов, когда они достигают критических величин.

Прогноз сроков начала дрейфа льда на озерах и водохранилищах осуществляется на основе неравенства

$$\varphi h_{\text{л}}^{0.5} \leq aw^2, \quad (3.30)$$

где φ – относительное разрушающее напряжение тающего льда на изгиб; $h_{\text{л}}$ – толщина льда; a – эмпирический коэффициент, равный 0.0018; w – максимальная в течение суток скорость ветра.

Составление прогноза заключается в последовательном расчете характеристик, входящих в выражение (3.30), с использованием прогноза метеозлементов на 5 суток. День, когда впервые будет выполнено неравенство (3.30) принимается за дату начала дрейфа льда. За дату очищения озера или водохранилища ото льда принимается день, когда $\varphi = 0$, а $h_{\text{л}} > 0$, т. е. лед полностью потерял прочность, хотя и не весь еще стаял.

3.5. Долгосрочные прогнозы

Как уже отмечалось ранее, к категории долгосрочных относятся прогнозы с заблаговременностью более чем 10 – 15 суток. С увеличением заблаговременности точность прогнозов снижается. Тем не менее, долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водоемов пользуются большим спросом. В России долгосрочные прогнозы выпускаются уже более 60 лет.

3.5.1. Долгосрочный прогноз характеристик весеннего половодья

Долгосрочный прогноз объема весеннего половодья

Прогноз объема (или слоя) весеннего половодья основан на использовании уравнения водного баланса. Если из объема весеннего стока исключить объем воды, обусловленный притоком грунтовых вод, то уравнение водного баланса речного бассейна за период половодья может быть записан в виде

$$h = h_c + P_{\text{ж}} - (I + P_{\text{п}} + E_1 + E_2), \quad (3.31)$$

где h – слой стока весеннего половодья; h_c – запас воды в снеге и ледяной корке на поверхности почвы перед началом снеготаяния; $P_{\text{ж}}$ – жидкие осадки, выпавшие на поверхность водосбора в период от начала снеготаяния до конца половодья; I – инфильтрация в почву; $P_{\text{п}}$ – количество воды, задержанной на поверхности бассейна; E_1 – испарение с поверхности снежного покрова за период снеготаяния; E_2 – испарение за время стекания воды по руслу.

Из всех входящих в уравнение баланса переменных только сток, запасы воды в снеге и осадки регулярно измеряются с той или иной степенью точности. Остальные составляющие не измеряются или вообще не могут быть измерены. Учитывая это,

на практике устанавливают зависимость объема стока за половодье только от главных факторов. В качестве примера можно привести эмпирическую зависимость, предложенную Е.Г. Поповым:

$$h = h_s - P_s \operatorname{th} \left(\frac{h_s}{P_s} \right), \quad (3.32)$$

где $h_s = (h_c + P_{\text{ж}})$; P_s – параметр, характеризующий суммарные потери воды.

Для прогноза по формуле (3.32) необходим расчет параметра P_s . Для этого по данным предшествующих наблюдений строят зависимость параметра P_s от степени увлажнения бассейна перед установлением морозов. Обычно в качестве такой характеристики используют различные индексы предшествующего увлажнения. В простейшем случае индекс имеет вид

$$u = P_5 + (P - E)_{60} + m, \quad (3.33)$$

где P и E – суммарные осадки и суммарное испарение за некоторый период, предшествующий установлению морозов (в данном случае – 5 и 60 суток); m – слой воды, поступивший в почву за время оттепелей.

При составлении прогноза на основе выражения (3.32) необходимо также знать запасы воды в снеге (h_c) и сумму жидких осадков ($P_{\text{ж}}$). Значение h_c рассчитывается на основе данных снегосъемок по методикам, которые описываются в специализированных курсах по гидрологии. В качестве $P_{\text{ж}}$ используется либо прогнозная сумма жидких осадков, либо их средняя многолетняя величина за период половодья.

Долгосрочный прогноз максимальных расходов (уровней) половодья

При устойчивой форме гидрографа можно прогнозировать максимальные расходы половодья в зависимости от слоя половодья:

$$Q_{\max} = f(h), \quad (3.34)$$

при этом зависимость (3.34) может иметь как линейный, так и нелинейный характер.

Для прогноза максимального уровня также используется зависимость (3.34). Вначале рассчитывается максимальный расход, а затем определяется максимальный уровень по кривой $Q = f(H)$.

3.5.2. Долгосрочный прогноз стока рек и притока воды в водохранилища в период межени

После прохождения весеннего половодья, когда приток талой воды полностью прекращается, а остаточный запас поверхностных вод в бассейне становится относительно небольшим, река переходит преимущественно на грунтовое питание. Изменение расходов грунтового питания при отсутствии в этот период дождевых осадков достаточно хорошо описывается уравнением экспоненты:

$$Q(t) = (Q_0 - q)e^{-ct} + q, \quad (3.35)$$

где Q_0 – начальный расход в реке; q – расход глубокого грунтового питания (расход базисного стока) в м³/с; t – время в сутках; c – константа, характеризующая интенсивность истощения сезонного запаса подземных вод; e – основание натурального логарифма.

Из формулы (3.35) следует, что при таком характере истощения стока между средними расходами реки, вычисленными за смежные интервалы времени продолжительностью T суток, существует линейная зависимость

$$\bar{Q}_2 = a\bar{Q}_1 + (1-a)q, \quad (3.36)$$

где a – коэффициент, определяемый по формуле

$$a = \exp(-cT). \quad (3.37)$$

Для определения коэффициентов c и q в формулах (3.36) – (3.37) по данным предшествующих наблюдений строят график линейной зависимости между среднедекадными или среднемесячными расходами воды в виде $\bar{Q}_2 = a\bar{Q}_1 + b$ и находят параметры уравнения регрессии a и b . Затем определяют c и q по формулам

$$c = \frac{\ln(a)}{T}, \quad q = \frac{b}{1-a}. \quad (3.38)$$

Выражение (3.35) используется для прогноза среднесуточных расходов воды для всего меженного периода, а выражение (3.36) – для прогноза среднемесячных или среднедекадных расходов с заблаговременностью T (месяц или декада).

В районах, где дождевая составляющая питания рек в меженный период играет существенную роль, прогностические зависимости имеют более сложный вид. В качестве дополнительного параметра в эти зависимости вводится сумма осадков за период заблаговременности прогноза.

3.5.3. Долгосрочные прогнозы ледовых явлений

Атмосферные процессы, определяющие появление льда на реках, их замерзание и вскрытие, охватывают одновременно значительные территории. Поэтому ежегодные отклонения сроков наступления этих явлений от климатической нормы оказываются довольно близкими для целого ряда рек, протекающих в пределах одного синоптического района. Исследование закономерностей развития атмосферных процессов позволяют составлять прогнозы ледовых явлений с достаточно большой заблаговременностью.

В практике долгосрочных ледовых прогнозов довольно широкое распространение получили методы, основанные на использовании различных индексов атмосферной циркуляции. Индексы атмосферной циркуляции позволяют количественно описать закономерности развития атмосферных процессов.

В качестве примера рассмотрим методику, которая применяется для прогноза сроков появления льда на реках Западной Сибири. На рассматриваемой территории выделяется два сферических прямоугольника, которые ограничены с юга 40° с. ш. и с севера 80° с. ш. Первый из них лежит между 60° и 105° в. д., второй – между 105° и 180° в. д. (рис.3.6). Первый сферический прямоугольник располагается западнее интересующего нас бассейна, а второй – включает его. Для каждого из прямоугольников по синоптическим картам (AT_{500}) рассчитывается среднемесячная высота изобарической поверхности 500 мб (H_{500}) за сентябрь и затем находится их разность. Эту разность называют индексом меридиональности (I_m).

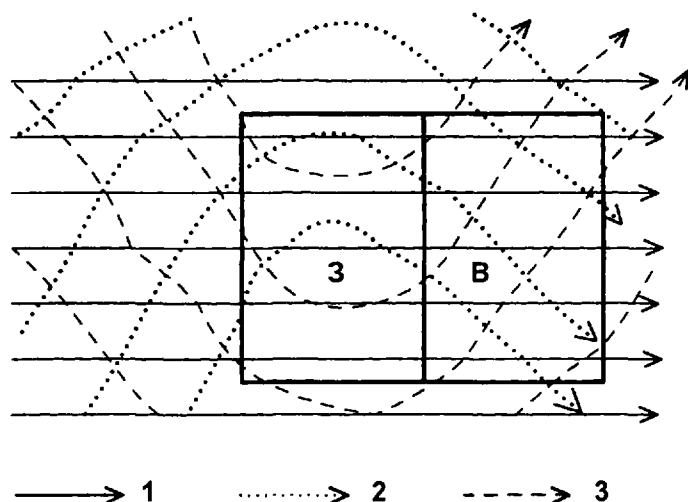
На рис.3.6 видно, что если ведущий поток направлен с северо-запада на юго-восток и обуславливает поступление холодного воздуха, то средняя высота H_{500} в западном прямоугольнике значительно выше, чем в восточном, и, следовательно, $I_m > 0$. Если с юго-запада выносятся теплые воздушные массы, то $I_m < 0$, при западном переносе I_m близок к нулю. Для территории Западной Сибири наиболее характерным является северо-западный перенос, здесь среднее значение индекса $I_m = 2.3$ декаметра.

Наряду с индексом I_m рассчитывается еще один индекс ΔP , который представляет собой осредненную разность аномалий давления в сентябре и августе по трем характерным метеостанциям (Иркутск, Енисейск, Сургут), расположенным на одной вертикальной оси.

Для Средней Оби прогноз отклонения срока появления льда от нормы (ΔT), производится по зависимости

$$\Delta T = -3.4\Delta P + m[1 - 0.93\lg(I_m + 7.7)]. \quad (3.39)$$

Если разность $(I_m - 2.3)$ и величина ΔP имеют разные знаки, то параметр m в выражении (3.39) равен 45, если одинаковые, то $m = 0$.



*Рис. 3.6. Схема определения индекса меридиональности:
З – западный сферический прямоугольник; В – восточный сферический
прямоугольник; 1, 2, 3 – изогипсы на картах AT_{300} соответственно при западном,
северо-западном и юго-западном переносе относительно прямоугольника В.*

Прогнозы с помощью выражения (3.39) составляются в начале октября и имеют заблаговременность в среднем около месяца.

Изложенная выше методика была разработана Х. П. Погосяном и Е. И. Савченковой, а впервые индексы атмосферной циркуляции были введены Г. Я. Вангенгеймом. Для характеристики атмосферной циркуляции он предложил типизацию синоптических процессов, основанную на понятии элементарного синоптического процесса. Под последним понимается процесс, в течение которого сохраняется географическое распределение

знака барического поля и направление основных переносов воздуха в пределах атлантико-евразийского сектора северного полушария.

Г. Я. Вангенгеймом по преобладающему направлению переноса воздуха выделены три основных типа циркуляции: западный *W*, центральный меридиональный *C* и восточный *E*. Характеристика атмосферных процессов для каждого месяца дается по аномальности, т. е. отличию от средних многолетних форм атмосферной циркуляции.

Если в данном месяце только одна форма наблюдалась чаще нормы, то аномалию циркуляции описывают одним индексом *W*, *C* или *E*. Если таких форм было две, то аномалию циркуляции описывают парой индексов *W + C*, *W + E* или *E + C*. Типизация Вангенгейма получила дальнейшее развитие в работах А. А. Гирса.

В практике долгосрочных гидрологических прогнозов, как правило, используются индексы, которые позволяют количественно оценить характер атмосферной циркуляции. Наряду с уже названным индексом меридиональности используются и другие индексы: индекс «контрастности», индекс «потеплений и похолоданий» и др. Описание этих индексов дается в специализированных курсах гидрологических прогнозов.

В общем виде прогностические зависимости, основанные на использовании индексов атмосферной циркуляции, имеют вид

$$\Delta T_t = f(I_{t-\tau}), \quad (3.40)$$

где ΔT_t – отклонение от нормы даты наступления ледового явления; $I_{t-\tau}$ – индекс, характеризующий развитие атмосферных процессов за предшествующий выпуску прогноза период.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что вкладывается в понятие гидрологический прогноз?
2. Как классифицируются гидрологические прогнозы?

3. Как производится оценка методов прогнозирования и оправдываемости гидрологических прогнозов?
4. Как производится прогноз уровней и расходов воды по методу линейной тенденции?
5. Как производится прогноз уровней и расходов воды по методу нелинейной тенденции?
6. Как определяется заблаговременность прогноза при использовании метода соответственных уровней?
7. Как производится прогноз стока по данным о запасах воды в русловой сети?
8. Перечислите характерные фазы ледообразования и вскрытия ледового покрова на водных объектах суши.
9. Как производится краткосрочный прогноз даты появления льда?
10. Как производится краткосрочный прогноз даты вскрытия рек?
11. Как осуществляется краткосрочный прогноз даты начала дрейфа льда на озерах и водохранилищах?
12. Как производится долгосрочный прогноз объема весеннего половодья?
13. Как производится долгосрочный прогноз стока рек и притока воды в водохранилища в период межени?
14. Что такое индексы атмосферной циркуляции?
15. Приведите пример использования индексов атмосферной циркуляции при разработке долгосрочных гидрологических прогнозов.

4. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

4.1. Общие положения

Водные ресурсы используются многопланово: для хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных мест и промышленных предприятий, орошения, выработки электроэнергии, судоходства, рыбоводства, осушения, обводнения, рекреации и др. Динамика потребления воды в течение года имеет различный характер для разных отраслей. Внутригодовые изменения водопользования связаны с сезонным характером колебаний климатических условий, определяющих сезонность работы некоторых предприятий и даже целых отраслей, например, судоходства, сельского хозяйства и др. Рассмотрим это на примере основных отраслей хозяйства.

Хозяйственно-питьевое водопользование отличается относительно равномерным потреблением воды в течение года и значительной неравномерностью в течение суток. При этом сезонные колебания, связанные с повышением температуры воздуха летом, не превышают 10–20%. В то же время суточные колебания значительны, так как 70% воды потребляется днем.

Для промышленного водопользования также характерна относительная равномерность потребления воды в течение года.

Максимум потребления воды для целей орошения приходится на летнюю межень (июнь-июль).

Гидроэнергетика заинтересована в наибольших объемах воды в период прохождения осенне-зимнего максимума электропотребления.

Водный транспорт использует воду только в период навигации, то есть, в основном, в течение летне-осенней межени. Для обеспечения судоходства в этот период требуются повышенные, по отношению к естественным, расходы воды.

Таким образом, суммарное водопользование с большей вероятностью будет превышать доступные водные ресурсы реки в периоды летне-осенней и зимней межени, на которые приходится всего 15 – 20% годового стока.

Для того чтобы увеличить доступные водные ресурсы в остродефицитные по водности периоды и привести крайне неравномерный естественный режим реки в соответствие с режимом водопользования, необходимо осуществлять регулирование стока водохранилищами. При этом естественный сток перераспределяется из многоводных лет и сезонов на маловодные, что позволяет в ряде случаев повысить доступные к использованию водные ресурсы на 35 – 40 %.

Основой для проведения регулирования стока являются водохозяйственные балансы.

4.2. Водохозяйственные балансы и принципы их составления

Водохозяйственные балансы разрабатываются в соответствии со ст.75 Водного кодекса Российской Федерации и представляют собой расчетные материалы, сопоставляющие потребность в воде с имеющимися на данной территории водными ресурсами при определенном уровне развития хозяйства.

Баланс выясняет доступные к использованию водные ресурсы, подтверждает возможность удовлетворить ими намечаемое развитие хозяйства или указывает на исчерпание (дефицит) водных ресурсов; устанавливает принципиальный состав водохозяйственных мероприятий по покрытию (сведению) дефицитов воды при различных вариантах размещения водоемких потребителей (регулирование стока водохранилищами, привлечение вод из других бассейнов и др.), определяет, в некоторых случаях, свободный объем воды, оставшийся в реке для использования его за пределами рассматриваемой территории.

Водохозяйственный баланс состоит из приходной и расходной частей.

Приходная часть баланса включает следующие элементы.

- Естественный поверхностный сток (Q_e).
- Доля эксплуатационных расходов подземных вод, которая гидравлически не связана с поверхностными (Q_n).
- Возвратные, дренажные, шахтные и сточные воды, поступающие в реку в пределах бассейна или его участка (Q_c).
- Воды, перебрасываемые из других бассейнов ($Q_{пер}$).
- Объемы сработки водохранилищ за расчетные интервалы времени ($Q_{в-ш}$). Эти объемы включаются затем в расходную часть баланса в период наполнения водохранилища.

Расходная часть баланса обычно включает следующие элементы.

- Воды, забираемые из реки выше створа на орошение, подпитку озер, а также на коммунально-бытовое и промышленное водоснабжение (за вычетом возвратного расхода, если водоотведение производится выше створа) ($Q_{заб}$).
- Воды, перебрасываемые в другие бассейны ($Q_{прб}$).
- Потери воды на дополнительное испарение с поверхности водохранилищ и прудов ($Q_{и}$).
- Потери речного стока, вызванные забором дренируемых подземных вод ($Q_{подз}$).
- Расходы попусков воды ниже расчетного створа ($Q_{поп}$). Попуски необходимы для нормальной работы водозаборов, поддержания санитарного состояния реки, обеспечения судоходства, а в некоторых случаях – обводнения пойм и нерестилищ.

Таким образом, уравнение водохозяйственного баланса в общем виде можно представить выражением:

$$Q_e + Q_n + Q_c + Q_{пер} \pm Q_{в-ш} - Q_{заб} - Q_{прб} - Q_{и} - Q_{подз} - Q_{поп} \leq 0.$$

Большая часть расходной составляющей формируется специальными попусками (расходами) воды ниже створа разработки баланса. Значения этих расходов воды устанавливаются

в соответствии с выявленными требованиями различных водопользователей к водным ресурсам реки ниже расчетного створа.

В настоящее время достаточно четкие требования к расходам попусков установлены только для судоходства и сельского хозяйства. В то же время каких-либо однозначных приемов установления попусков, отвечающих требованиям охраны окружающей среды, пока нет. Сложившаяся практика назначения экологических, в том числе и санитарных попусков воды по величине естественного минимума летне-осенней или зимней межени, не имеет научной основы и может приводить к искусственному занижению дефицитов водных ресурсов при расчетах водохозяйственных балансов на перспективу. Данный вопрос требует безотлагательного решения с учетом обоснованных критериев допустимости воздействия на природные комплексы.

Расчет водохозяйственных балансов производится в удобной табличной форме в условиях стока разной водности, как правило, обеспеченностью (по стоку) 50, 75, 90 и 95%.

Колебания стока внутри года и сезонная неравномерность водопользования обуславливает необходимость составления балансов по интервалам времени, в пределах которых этими изменениями можно пренебречь. Как правило, можно ограничиваться декадными интервалами в период половодья и месячными – в период межени.

Для сохранения в расчетах реальных соотношений водности в различных частях бассейна рекомендуется составлять балансы для годового и сезонного стока в замыкающем створе и в устьях крупных притоков. Баланс составляется для конкретных лет, близких по водности к году расчетной обеспеченности. При таком подходе, позволяющем автоматически учесть распределение стока между реками и участками рек бассейна, может оказаться необходимым предварительно рассмотреть 5 – 8 характерных по водности лет с различным внутригодовым и внутрибассейновым распределением стока и выбрать наиболее неблагоприятные (с наибольшими дефицитами воды).

Во избежание занижения доступных к использованию водных ресурсов сток рек за характерные годы, принятые в качестве расчетных, следует приводить к естественным условиям, увеличивая его на объем безвозвратного водопотребления выше рассматриваемого створа, имевшего место в этот год.

Водохозяйственные балансы составляются чаще всего для условий водохозяйственного года (с начала половодья до конца зимней межени) в млн. м³.

В качестве примера в табл. 4.1 составлен водохозяйственный баланс реки Днепра в условиях маловодного года.

По итогам водохозяйственных балансов для некоторого расчетного уровня развития можно выделить следующие случаи.

1. Положительный баланс, когда для всех расчетных интервалов времени объем приходной части баланса больше расходной части и дополнительных водохозяйственных мероприятий на данном уровне не требуется. При этом складывающийся избыток водных ресурсов в регионе позволяет осваивать новые виды водопользования, не ущемляя существующие.

2. Увязанный баланс, при котором наблюдается динамическое равновесие между приходной и расходной частями баланса. В этом случае для развития водозабора необходимо проведение специальных водохозяйственных мероприятий по изысканию дополнительных водных ресурсов внутри региона или осуществление переброски вод извне.

3. Отрицательный баланс, когда наличные водные ресурсы региона недостаточны для удовлетворения потребности в воде с необходимой степенью обеспеченности, включая требования к расходам воды ниже створа разработки баланса. В этом случае необходимы следующие мероприятия:

- при дефиците воды в отдельные расчетные интервалы времени и отсутствии его в годовом балансе маловодного года возникает необходимость проведения сезонного регулирования стока водохранилищем, то есть перераспределения стока из многоводного сезона (половодье) на межень;

Таблица 4.1

Водохозяйственный баланс р. Днепр в условиях маловодного года обеспеченностью 95%, млн. м³

Элемент баланса	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	Год
Приходная часть													
Естественно-быговой сток	4718	9121	5533	2372	1924	1529	1433	1271	1560	765	1271	1080	32577
Переброска стока из других бассейнов	22	22	22	60	60	60	60	22	22	22	22	21	415
Добавка за счет регулирования водохранилищами	-2863	-6769	-1759	1859	2990	2887	159	-71	-42	1627	1122	1314	454
Подземные и шахтные воды	157	157	157	157	157	157	157	157	157	157	157	157	1884
Итого:	2034	2531	3953	4448	5131	4633	1809	1379	1097	2571	2572	2572	35330

Таблица 4.1. (продолжение)

Элемент баланса	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	Год
Расходная часть													
Безвозвратные заборы воды:													
промышленностью	240	240	300	300	311	300	300	300	240	240	240	240	3251
коммунальным хозяйством	110	120	130	130	130	130	130	118	100	100	100	100	1398
сельскохозяйственным владельцами	60	60	60	75	71	71	71	71	60	60	60	60	1398
на увлажнение почвы	—	—	—	230	230	230	230	230	—	—	—	—	1 150
на орошение	—	480	900	1100	1100	1100	900	900	208	—	—	—	6688
рыбным хозяйством	—	—	—	180	200	200	200	82	—	—	—	—	862
Потери на испарение	—	210	450	420	550	480	420	270	210	190	—	—	3200
Переброски стока в Крым	110	600	600	600	600	600	600	600	506	110	110	110	5146
Санитарные попуски в Крым	1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315	1315	15780
Итого:	1845	3025	3710	4350	4507	4426	4116	3886	2639	2015	1825	1825	38254
Избыток или дефицит	189	-494	243	98	614	207	-2357	-2507	-942	556	747	747	-2924
Сезонный дефицит								-5806					

- отсутствие дефицита стока лишь в балансе среднего по водности года показывает на необходимость проведения многолетнего регулирования стока или привлечения дополнительных источников;
- дефицит в балансе среднего по водности года может быть устранен только путем привлечения в рассматриваемый бассейн вод извне.

Для ликвидации выявленных дефицитов стока намечают водохозяйственные мероприятия (регулирование стока, подача его из смежных бассейнов), достаточность которых проверяют повторным воднобалансовым расчетом. На основании отрицательного водохозяйственного баланса может быть сделан вывод о необходимости ограничения роста водопотребления, то есть об отказе от развития в бассейне той или иной водоемкой отрасли.

В настоящее время практически все бассейны южной зоны характеризуются напряженным или отрицательным водохозяйственным балансом (Волга, Урал, Дон, Днепр, Днестр, Кура, Кубань, Амударья, Сырдарья и др.).

Сведение водохозяйственных балансов бассейнов южной зоны в обозримой и, особенно отдаленной перспективах, возможно за счет форсирования следующих основных мероприятий:

- экономного использования водных ресурсов и научно обоснованного снижения норм водопотребления;
- строительства гидроузлов с крупными водохранилищами, регулирующими речной сток в соответствии с заданным режимом водопотребления;
- более интенсивное вовлечение в хозяйственное использование подземных вод;
- привлечения сюда части стока из районов, богатых водными ресурсами.

4.3. Водохранилища и их хозяйственное значение

4.3.1. Определение и типы водохранилищ

Наиболее распространенным и эффективным средством управления водными ресурсами и решения многих водных проблем является регулирование стока водохранилищами.

Водохранилища – особая категория внутренних водоемов со специфическими особенностями водообмена, проточности и сезонного колебания уровня. На сегодня нет единого принятого во всех странах определения водохранилищ и четкого их разграничения с прудами и бассейнами. От первых они отличаются размерами, а от вторых тем, что имеют преимущественно естественные ложа и берега.

По рекомендации Института водных проблем (ИВП РАН) водохранилищами следует считать искусственные и естественные водоемы с замедленным водообменом объемом более 1 млн. м³, уровеньный режим которых постоянно регулируется гидротехническими сооружениями для накопления воды в целях ее хозяйственного использования.

С помощью водохранилищ решаются разнообразные хозяйственные задачи:

- гарантируется водоснабжение населения, промышленности, сельского хозяйства;
- создаются условия для использования гидроэнергетического потенциала рек;
- улучшаются условия судоходства и лесосплава;
- обеспечивается развитие рыбного хозяйства и ферм водоплавающих птиц и зверей;
- открываются новые возможности для организации отдыха;
- смягчается климат прилегающих территорий;
- водохранилища защищают от наводнений и путем попусков улучшают качество вод в реках.

Наряду с большой пользой, создание водохранилищ сопровождается и негативными последствиями, вызываемыми их

строительством. Многие из них вызваны безграмотным отношением к новым географическим образованиям. Так, например, обрушению берегов водохранилищ способствуют распашка земель вплоть до уреза, отсутствие действенной водоохранной зоны по периметру водохранилищ. «Цветение» воды и как следствие ухудшение ее качества есть результат сброса в водохранилище неочищенных и слабоочищенных сточных вод и вод с сельхозугодий, а также грубая подготовка ложа водохранилища к затоплению. Возможные негативные явления, вызываемые водохранилищами, в настоящее время надежно прогнозируются и по возможности ликвидируются или смягчаются.

К числу параметров, определяющих основные размеры водохранилищ, следует отнести (рис. 4.1):

- ФПУ – форсированный подпорный уровень;
- НПУ – нормальный подпорный уровень;
- УМО – уровень мертвого объема;
- $V_{\text{пол.}}$ – полезный объем водохранилища;
- $V_{\text{умо}}$ – мертвый объем;
- $V_{\text{полн.}} = V_{\text{пол.}} + V_{\text{умо}}$ – полный объем водохранилища, соответствующий НПУ;
- $F_{\text{нпу}}$ – площадь водной поверхности водохранилища при НПУ;
- $F_{\text{умо}}$ – площадь водной поверхности при УМО;
- $h_{\text{срб}}$ – уровень сработки водохранилища.

Под НПУ понимается наивысший уровень водохранилища, который подпорные сооружения могут поддерживать в нормальных условиях эксплуатации в течение длительного времени.

Под УМО понимается самый низший уровень, до которого срабатывается водохранилище в процессе нормальной его эксплуатации.

Под полезным объемом водохранилища понимается объем, непосредственно осуществляющий регулирование стока. Он заключен в слое водохранилища высотой $h_{\text{срб}}$ (между НПУ и УМО).

При пропуске катастрофических половодий и паводков допускается кратковременное повышение уровня воды в водохранилище над НПУ до отметки, называемой форсированным подпорным уровнем (ФПУ). Объем водохранилища, заключенный между ФПУ и НПУ называется форсированным и используется для дополнительной трансформации (срезки) катастрофических максимальных расходов половодий и паводков.

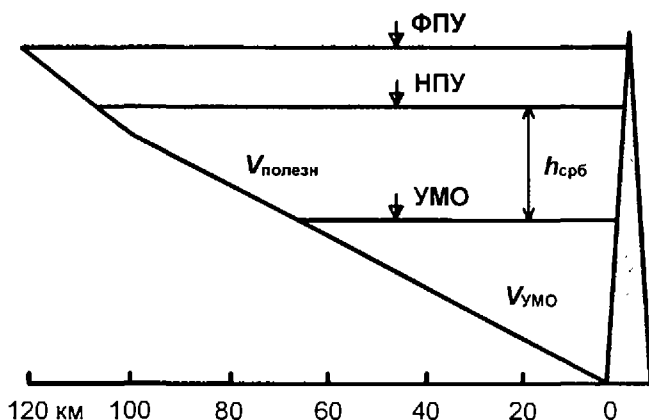


Рис. 4.1. Схематизированный профиль водохранилища

Основные параметры водохранилища выбираются на основе анализа топографических, геологических, экономических и природоохранных условий.

Топографические условия определяют площадь водного зеркала, объем водохранилища, его глубину и т. д.

Геологические условия определяют НПУ и возможную высоту подпорных сооружений (плотины). Например, все высокие плотины сооружены на скальных основаниях, являющихся, с точки зрения несущей способности наиболее благоприятными.

Под экономическими условиями выбора НПУ понимаются денежные и материальные затраты, связанные с постройкой

подпорных сооружений и компенсацией ущерба от затопления населенных пунктов, промышленных предприятий, сельскохозяйственных и лесных угодий и т. д. При выборе НПУ по возможности избегают затопления особо ценных народнохозяйственных объектов. По экономическим условиям местоположение водохранилищ и их НПУ выбирают исходя из сохранения природного равновесия. Избегают затопления пахотных земель, лесных угодий, заповедных зон и уникальных природных комплексов. Так на отдаленную перспективу отнесено сооружение таких водохранилищ на Енисее, как Средне-Енисейское и Осиновское, в зону затопления которых попадают около 70 млн. м³ леса и пойменные земли.

Неиспользуемый или мертвый объем водохранилища, отвечающий УМО, должен предусматриваться при проектировании водохранилищ как одноцелевого, так и многоцелевого назначения. Он позволяет обеспечить следующее:

- минимальный объем воды в зоне отдыха;
- минимальный напор воды для выработки электроэнергии;
- резервный объем для будущего отложения наносов;
- минимальный объем воды для поддержания условий существования рыб и биоценоза;
- минимальные глубины для навигации;
- минимальный объем воды по условиям ее качества;
- минимальный уровень воды, гарантирующий бесперебойную работу сооружений, отводящих воду из водохранилища (каналов, трубопроводов, насосных установок).

Как правило, водохранилище не срабатывается ниже отметки мертвого объема независимо от того, для какой цели этот объем предусматривается, однако уровень воды неиспользуемой призмы может меняться от сезона к сезону.

Методы определения мертвого объема водохранилища слабо освещены в технической литературе и приводятся главным образом в проектной документации. Иногда на предварительных этапах проектирования объем неиспользуемой призмы водохра-

нилища принимается равным или большим того объема, который отводится для будущих отложений наносов, причем профиль отложений наносов предполагается плоским. Если при таком предположении не обеспечиваются удовлетворительные условия для рекреации, существования рыб, и т. п., то для этих целей предусматривается дополнительный объем воды. Любые дополнительные затраты, к которым приведет увеличение неиспользуемого объема водохранилища, должны быть обоснованы соответствующими требованиями, под которые они предусматриваются. В проектной практике отметка УМО, как и НПУ, выбирается в результате технико-экономического рассмотрения нескольких вариантов. Выбирая НПУ, мы тем самым выбираем полный объем водохранилища и максимальный напор на гидроузле, а выбирая УМО, – полезный объем водохранилища и минимальный напор, а также параметры, определяющиеся этой отметкой, например, гарантированную водоотдачу из водохранилища. Таким образом, параметры водохранилища являются взаимосвязанными и выбор их должен осуществляться как единое целое.

Пределы изменения параметров действующих водохранилищ:

- полный объем водохранилищ (при НПУ) изменяется от 1 млн. м³ до 169.3 км³ (Братское на р.Ангаре) и 204.8 км³ (Оуэн-Фолс на оз. Виктория);
- площадь водного зеркала при НПУ – от 0.3 – 0.5 км² до 6450 км² (Куйбышевское на р. Волге) и 8480 км² (Вольта на р.Вольта);
- глубина – от нескольких метров до 250 – 300 м;
- максимальная сработка водохранилищ (в пределах от НПУ до УМО) – от нескольких десятков сантиметров до 100 м (Саяно-Шушенская на р. Енисее срабатывается ежегодно на 40 м).

Из практики проектирования величина сработки водохранилищ не должна превышать 1/3 максимального напора, а полный объем – двух-трех годовых объемов стока.

В последние годы появилось много работ (А.Б.Авакян, В.А.Шарапов, Б.Б.Богословский, Ю.М.Матарзин и др.), в которых с разной степенью детализации рассматриваются вопросы типизации водохранилищ по разным признакам. Прежде всего, в основу типизации водохранилищ должен быть положен признак их генезиса, указывающий на способ их образования. По генезису рекомендуется различать следующие типы водохранилищ:

1. *Водохранилища в долинах рек*, перегороженных плотинами (речные водохранилища). Ложем их служат участки речных долин. Они характеризуются удлиненной вытянутой формой. Основной отличительной особенностью данного водохранилища является уклон дна и соответствующее увеличение глубин от верховьев к замыкающему створу водохранилища.
2. *Зарегулированные озера* (озера-водохранилища). Ложем их служат озерные котловины. Они характеризуются округлой или слабовытянутой формой. Основной отличительной особенностью водохранилищ озерного типа являются отсутствие одностороннего уклона дна, и сосредоточение наибольших глубин в центральной части котловины.
3. *Озерно-речные водохранилища смешанного типа*, ложем которых служат часть речной долины и озерная котловина. Они характеризуются узким вытянутым приплотинным участком и озеровидным расширением в центральной части водохранилища. Основной отличительной особенностью этого типа водохранилищ является хорошо выраженный порог в месте бывшего истока реки из озера.
4. *Наливные водохранилища*, создаваемые в естественных понижениях местности, куда по каналам подводятся паводковые и паводковые воды. Такие водохранилища сооружаются большей частью в засушливых районах.
5. *Подземные водохранилища*, при создании которых в качестве емкости используются подземные пустоты, например карстовые.

6. *Морские водохранилища в прибрежных участках моря* – в морских заливах, бухтах, лиманах и эстуариях, отделенных от открытого моря дамбами.

На территории Советского Союза находилось около 4000 водохранилищ. Сейчас в пределах России действует более 2000. В табл. 4.2. приведены сведения по водохранилищам, прошедшим паспортизацию. Для сравнения даны сведения по водохранилищам США.

Таблица 4.2

Сведения по водохранилищам

Страна	Количество	Объем, км ³		Площадь зеркала, км ²	
		полный	полезный	при НПУ	в том числе подпертых озёр
СССР	2552	1200	600	145000	58000
Россия	1162	924.5	433.5	115400	52600
США	5500	850	556	60000	20000

4.3.2. Виды регулирования стока водохранилищами и их основные характеристики

Регулирование стока – перераспределение во времени объема стока в соответствии с требованиями водопользования. По степени перераспределения стока во времени различают следующие виды регулирования: суточное, недельное, сезонное, годовичное, многолетнее и соответственно водохранилища суточного, недельного, годовичного и многолетнего регулирования. Встречаются также компенсирующее и так называемое вторичное непериодическое регулирование.

Водохранилище суточного регулирования стока предназначено для перераспределения в течение суток равномерного

стока реки в соответствии с неравномерным водопотреблением, например, для повышения расходов в часы утреннего и вечернего максимума за счет снижения водопотребления в ночные и обеденные часы. Данный вид регулирования стока находит широкое использование в отраслях водоснабжения и энергетики, когда при недостатке воды в источнике суточное регулирование позволяет удовлетворить большее число водопотребляющих единиц, а главное – покрыть значительную часть графика электрической нагрузки.

Полезный объем водохранилища, необходимый для проведения суточного регулирования стока, численно равен объему избытков стока в ночные часы, когда расходы водопользования значительно меньше среднесуточного расхода реки (рис. 4.2).

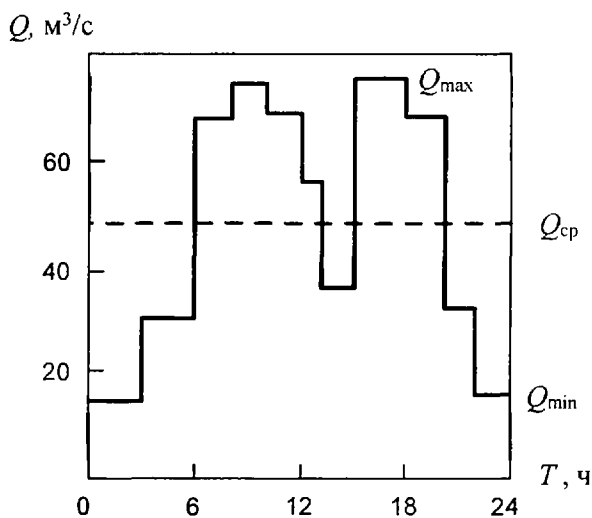


Рис. 4.2. Схема суточного регулирования стока

Водохранилище недельного регулирования стока (рис. 4.3) предназначено для перераспределения в течение недели практически равномерного стока реки соответственно повышенному

водопотреблению в рабочие дни и пониженному – в нерабочие. Объем водохранилища, необходимый для проведения недельного регулирования стока, также определяется объемом избытков в нерабочие дни недели.

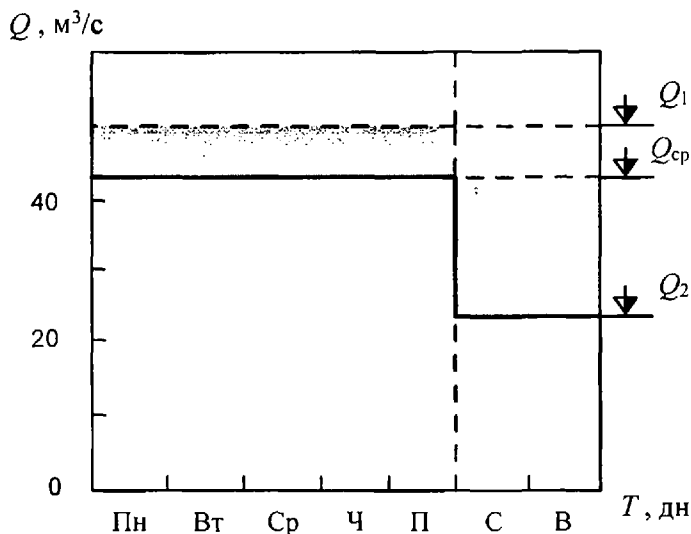


Рис. 4.3. Схема недельного регулирования стока.

Водохранилище сезонного регулирования стока предназначено для перераспределения стока из многоводных сезонов года в маловодные. Такое регулирование обусловлено внутригодовой неравномерностью стока и несовпадением величины стока и водопотребления во времени. Это наиболее распространенный вид регулирования.

Сущность сезонного регулирования сводится к следующему: в период превышения стока над используемым расходом водохранилище наполняется, а в период недостатков – срабатывается (рис. 4.4.).

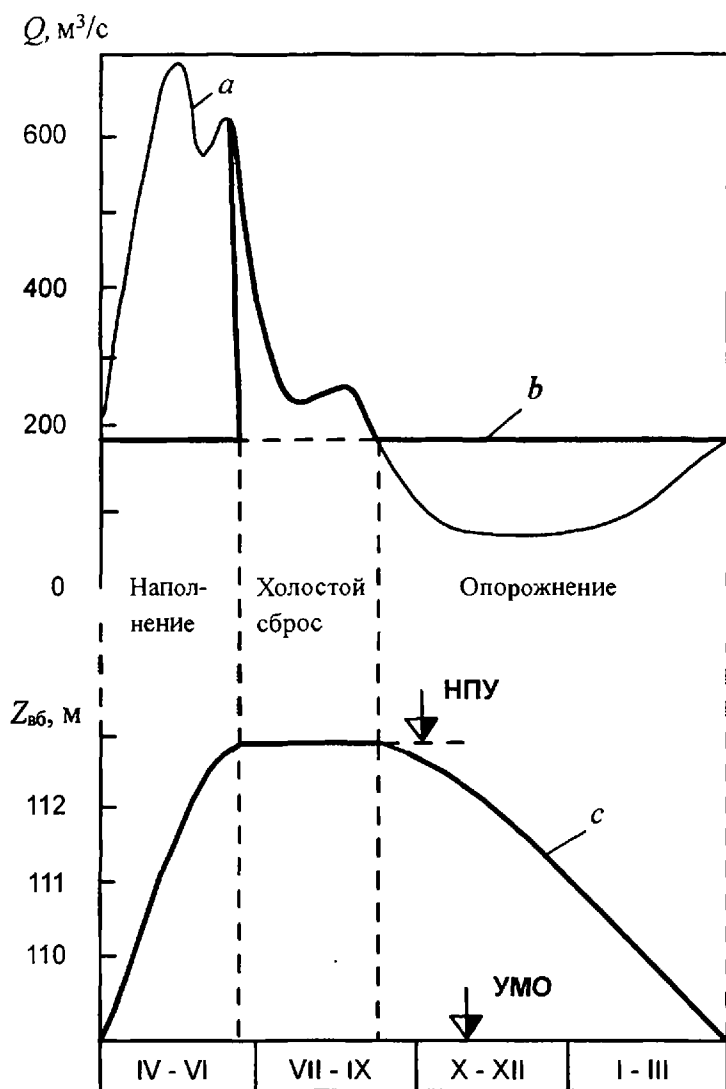


Рис. 4.4. Схема сезонного регулирования стока:
a – естественные расходы воды, *b* – зарегулированные расходы воды,
c – уровни воды верхнего бьефа водохранилища

Величина потребного полезного объема водохранилища для осуществления сезонного регулирования определяется объемом дефицита стока (разность между используемым расходом и естественными расходами) в период межени.

После заполнения полезного объема (наполнение водохранилища до НПУ) часть стока может быть сброшена вхолостую, минуя водоприемные отверстия ГЭС или другого водопользователя.

Объемы превышения и дефицита стоков над потреблением в расчетном маловодном году балансируются только в том случае, когда зарегулированный (используемый) расход доведен до величины среднегодового расхода рассматриваемого года. Такое регулирование стока, при котором наблюдается полное выравнивание стока до величины среднегодового расхода расчетного маловодного года, называется годичным и соответствует теоретическому пределу сезонного регулирования стока.

Водохранилище многолетнего регулирования стока предназначено для перераспределения стока не только внутри года, но и стока из многоводных и средневодных лет и периодов в маловодные.

Полезный объем водохранилища многолетнего регулирования численно равен объему дефицита стока за маловодное *n*-летие расчетной обеспеченности. Этот дефицит покрывается из многолетних запасов воды, создаваемых в водохранилище за предшествующий многоводный период. Теоретическим пределом многолетнего регулирования является полное выравнивание стока до среднемноголетнего расхода. В этом случае холостые сбросы отсутствуют и при правильной эксплуатации водохранилища весь сток реки, за исключением испарения и фильтрации, может быть полезно использован для хозяйственных нужд (выработки электроэнергии, водоснабжения и т.д.).

Добиться полного выравнивания стока возможно только ценой больших затрат на сооружение крупнейших водохранилищ, которые с хозяйственной точки зрения, как правило,

не оправдываются. Однако в ряде случаев при создании водохранилищ на реках, сток которых в многолетнем разрезе выровнен (при относительно малых коэффициентах изменчивости годового стока — C_v), иногда экономически целесообразно доведение зарегулированного расхода до величины, близкой к среднемуголетнему расходу. Таким образом, полезный объем водохранилища находится в прямой зависимости от степени регулирования стока. Например, по данным института «Гидропроект» для суточного регулирования стока р. Волги в Куйбышевском водохранилище достаточен объем 0.05 км^3 , для недельного — 0.5 км^3 , для годового — 35 км^3 , а для многолетнего регулирования стока потребовалось бы увеличение объема до 70 км^3 .

При сезонном регулировании стока цикл работы водохранилища (наполнение — сработка) замыкается в пределах одного водохозяйственного года, а при многолетнем — этот цикл продолжается несколько лет. Маловодный период, в течение которого наполненное водохранилище полностью срабатывается, принято называть критическим периодом сработки водохранилища.

В водохозяйственной практике встречаются также другие виды регулирования — компенсирующие, так называемые вторичное и непериодическое регулирование речного стока.

Компенсирующее регулирование применяется при расположении пункта водозабора или водопользования ниже водохранилища, причем на участке между ними имеется существенный нерегулируемый сток. В этом случае водохранилище проектируется на обеспеченное покрытие дефицита между годовым графиком водопотребления и расчетным гидрографом стока с незарегулированного участка. Водохранилище должно так зарегулировать проходящий через него сток, чтобы с учетом нерегулируемого промежуточного притока можно было получить необходимый режим расходов в пункте водозабора.

Вторичное (или повторное) регулирование стока — вид регулирования, который вызывается в основном не режимом стока, а режимом регулирования на вышерасположенной

водохозяйственной установке, не удовлетворяющем требованиям потребителей воды, расположенных ниже. Так, например, гидроэлектростанция, регулирующая сток на покрытие суточных, недельных и сезонных максимумов нагрузки, может не удовлетворять (по суточному, недельному и годовому графикам турбинных расходов) условиям водного транспорта, ниже расположенным водозаборам промышленного и сельскохозяйственного назначения и т.п.

В таком случае требуется перерегулирование расходов ГЭС. Например, водохранилище Майнской ГЭС на Енисее выравнивает суточную и недельную неравномерность расходов выше-расположенной Саяно-Шушенской ГЭС, в результате ниже Майнской ГЭС создаются нормальные условия для судоходства.

Непериодическое регулирование отличается от предыдущих видов тем, что оно не имеет точно закрепленного графика работы водохранилища. Сработка и наполнение водохранилища осуществляются по мере надобности и возможности. Этот вид регулирования применяется преимущественно в лесосплаве и в специальных случаях на водном транспорте, а также в санитарных, сельскохозяйственных и рыбохозяйственных целях. Оно осуществляется или специально созданными водохранилищами, или обычными (ведущими другие виды регулирования).

В лесосплаве непериодическое регулирование применяется наряду с суточным и сезонным. В отличие от сезонного, при котором сплавные условия обеспечиваются круглосуточно в течение всего периода проведения лесосплавных работ, при непериодическом (как и при суточном) регулировании необходимые для лесосплава условия создаются в течение нескольких часов, пока дается сосредоточенный попуск из водохранилища. При этом накопление воды в водохранилище (в отличие от суточного регулирования) производится в течение ряда суток.

В водном транспорте непериодическое регулирование применяется при необходимости повысить сосредоточенными попусками на некоторое время судоходные глубины на нижележащих перекатах. Например, в конце августа 1974 г.

из Ленинграда для строящейся Усть-Илимской ГЭС водным путем через северные моря, Енисей и Ангару доставлены два рабочих колеса гидроагрегатов. Ангара в это время мелководна, поэтому пришлось делать специальные попуски из Братского водохранилища, что обеспечило необходимые для прохода судов глубины.

В санитарных целях кратковременными сосредоточенными попусками пользуются для временного затопления участков реки, зараженных личинками малярийного комара, с целью борьбы с очагами малярии. В последнее время практикуются попуски для регулирования качества речной воды, загрязненной промышленными и бытовыми стоками. Такие попуски вследствие разбавления снижают концентрацию минеральных и органических примесей, оказывают положительное влияние на процессы самоочищения реки и, следовательно, являются эффективным водоохранным мероприятием.

В периоды маловодий в низовьях Днестра практикуются попуски воды из Дубоссарского водохранилища для спасения экосистем в устьевой части реки.

В сельском хозяйстве временными попусками пользуются для затопления пойменных луговых угодий и при лиманном орошении, а в рыбном хозяйстве — для повышения глубин в местах нерестилищ (в низовьях Волги, Дона, Днепра и пр.).

4.3.3. Влияние водохранилищ на гидрологический режим водотоков и природе прилегающих территорий

Водохранилища создаются для регулирования (перераспределения) крайне неравномерного во времени и по территории естественного речного стока в интересах хозяйства. В то же время создаваемые искусственно водоемы могут оказывать негативное воздействие на природную среду. С целью повышения хозяйственной эффективности водохранилищ и снижения их негативных последствий необходимо предвидеть механизм этих

воздействий на процесс стока и окружающую среду прилегающих территорий.

По характеру воздействий водохранилищ на природные условия их условно разделяют на прямые и косвенные.

Прямые воздействия сводятся к следующему. Главным из них является затопление земли, которое полностью исключить не представляется возможным. По данным ИВП РАН общая площадь затопленных водохранилищами земель в России составила 4,5 млн. га или 0,3 % от общего земельного фонда страны, в Канаде – 0,6 %, в США – 0,8 %.

Дополнительное отчуждение земель вызвано подтоплением берегов, которое обусловлено подъемом уровней грунтовых вод под воздействием подпора уровней в реке. Площадь подтопленных водохранилищами ГЭС земель составляет 3–15 % от площади затопления. Общая площадь подтопления не установлена из-за отсутствия гидрогеологических наблюдений.

Вследствие появления больших водных поверхностей значительно усиливаются волновые процессы на водохранилищах. При этом ветровые волны достигают высоты 4–5 м, вызывая трансформацию берегов водохранилищ. Указанное явление получило название «переработки берегов». В результате переработки береговая линия отступает на десятки и сотни метров (водохранилища Волжского и Днепровского каскадов, Новосибирской ГЭС и т.д.), что приводит к потерям территории. Площадь земель, расположенных в зоне переработки берегов составляет обычно 3 – 5% от площади затопления.

Из-за неправильного выбора подпорных уровней водохранилищ и интенсивного берегообрушения на ряде водохранилищ появляются мелководья. Из-за их появления происходят неблагоприятные гидробиологические и гидрохимические процессы, влекущие за собой цветение воды и ухудшение, в связи с этим, санитарного состояния водоема. Это положение усугубляется сбросом в водохранилище плохо очищенных сточных вод и резким замедлением водообмена. Так, например, в наиболее

крупных зарегулированных речных системах (Волга, Днепр, Енисей, Нарын, Вахш и др.) водообмен (полное обновление объема воды) замедлился не менее чем на порядок.

Образование водохранилищ и сопутствующий ему подъем уровня грунтовых вод может оказать влияние на ход оползневых процессов в его берегах, активизируя старые или вызывая новые.

Одним из негативных факторов является и социальный вопрос, связанный с переселением людей. К настоящему времени из зон водохранилищ переселено около 1 млн. человек.

Создание водохранилищ может негативно воздействовать и на рыбное хозяйство. Здесь следует указать на два обстоятельства. С одной стороны, подпорные сооружения препятствуют проходу рыбы к местам нерестилищ, а с другой стороны требования рыбного хозяйства к режиму уровней водохранилища и стоку из них полностью противоречат тем целям, для которых собственно создается водохранилище.

Создание водохранилищ и сам процесс регулирования речного стока приводят к изменению гидрологического режима в обоих бьефах.

Из-за увеличения зеркала водной поверхности возрастает испарение, что влечет за собой заметное увеличение безвозвратных потерь воды из верхнего бьефа реки.

Изменяется гидрологический режим и в нижнем бьефе гидроузла и тем значительнее, чем больше глубина проводимого регулирования стока. В результате регулирования стока резко повышаются меженные (летние и зимние) расходы и снижаются высокие (половодные и паводочные) расходы.

Вследствие срезки пиков половодий и паводков уменьшаются затопления в нижнем бьефе, что приводит к обезвоживанию пойм и их постепенному остепнению.

Повышение зимних расходов, сбрасываемых в нижний бьеф из глубинных слоев водохранилищ, температура которых более высокая, чем в реке, приводит к образованию полыньи. Длина

полюньи нередко достигает нескольких десятков километров (80 – 100 км и более в нижнем бьефе Красноярской ГЭС на р. Енисее; 40 – 60 км в нижнем бьефе Вилюйской ГЭС на р. Вилюе; 15 – 20 км в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС и т.д.). Размеры полюньи определяются глубиной водохранилища, величиной зимнего зарегулированного расхода и метеорологическими условиями (температура воздуха, облачность и т.д.). Полюнья – это «фабрика шуги». Интенсивное образование шуги приводит к зажорным подъемам уровней (до 4–5 м), в результате которых наблюдаются зимние затопления и подтопления (р. Енисей ниже Красноярской ГЭС, нижний бьеф Беломорской ГЭС и т.д.).

Изменение температурного режима воды в нижнем бьефе нарушает ледовые переправы, что затрудняет транспортные связи с островами и берегами водотока (Енисей, Обь, Нижняя Тунгуска). Заметное снижение температуры воды в водохранилище летом и осенью по сравнению с температурой воды в реке, приводит к более раннему ледоставу и сокращению сроков навигации и изменению фауны.

Из-за оседания значительной части наносов в водохранилище в нижний бьеф сбрасывается осветленный поток, обладающий повышенной размывающей способностью. Это приводит к интенсивным размывам русла, которые продолжают длительное время и распространяются на большие расстояния.

Деформация русла на протяжении нижнего бьефа усиливается под воздействием проводимого на ГЭС недельного и суточного регулирования, в результате которых увеличиваются скорости течения. В связи с размывом русла снижаются (проседают) уровни в реке как непосредственно ниже гидроузла, так и на значительном расстоянии от него. По опыту эксплуатации многих гидроузлов на реках нашей страны величина понижения уровней непосредственно у плотины изменялась от 0.50 м до 1.10 м и более. При этом ухудшались условия работы водозаборов, падали навигационные глубины, обнажался неморозостойкий бетон и т.д.

Косвенные воздействия водохранилищ на окружающую среду изучены не столько полно, как прямые, хотя некоторые формы их проявления уже очевидны сейчас.

На территориях, прилегающих к крупным водохранилищам, происходит изменение климата. На этих территориях наблюдается повышение влажности воздуха и образование довольно частых туманов, изменяется направление и скорость ветра, уменьшается годовая амплитуда температуры воздуха и т.д.

К косвенным воздействиям водохранилищ следует отнести и возникновение или повышение сейсмической активности в прилегающих к ним районах. Например, при заполнении Нурекского водохранилища на р. Вахш число землетрясений возросло до 30–40 в 10-летие против 3–4 до заполнения водохранилища. Это потребовало замедления наполнения водохранилища.

Конечно, было бы неправильно утверждать, что все прямые и косвенные воздействия водохранилищ ГЭС на окружающую среду (а их гораздо больше, чем здесь рассмотрено) имеют только негативную сторону. Обычно каждое из них и в совокупности обладают комплексом как отрицательных, так и положительных свойств. Так, появление в водохранилище мелководий может иметь и положительное значение, если на их месте создать условия для разведения дикого риса, водоплавающей птицы, нутрии, ондатры. Из заиленной прибрежной зоны можно извлекать высокопродуктивное удобрение – ил. Снижение максимальных расходов воды, сбрасываемых в нижний бьеф, уменьшает наводнения в нижнем бьефе и создает условия для эффективного развития прибрежных районов. Увеличение водности зимой обеспечивает лучшее разбавление стоков и способствует интенсификации процессов самоочищения на обводненных участках рек, без чего их санитарное состояние было бы значительно худшим. Как уже отмечалось, при создании водохранилищ в зону затоплений и подтоплений попадают высокопродуктивные сельскохозяйственные земли, что наносит определенный ущерб сельскому хозяйству. Вместе с тем на базе созданных

водохранилищ интенсивно развивается орошаемое земледелие как в верхнем бьефе, так и в нижнем бьефе на землях, ранее затоплявшихся при наводнениях. Эффект при этом в сельском хозяйстве в ряде случаев значительно превосходит наносимые ущербы (Токтогульское, Рагунское, Бурейское, Зейское и др. водохранилища).

Нельзя утверждать, что все формы воздействия водохранилищ являются неизбежными и органическими пороками гидротехнического строительства. Многие выявленные из них в процессе создания и эксплуатации водохранилищ явились следствием неправильного проектирования и нарушения установленных правил эксплуатации (рыбное хозяйство, зимние затопления и подтопления, подвижки льда и т.д.).

Бороться с главным негативным фактором строительства водохранилищ – затоплением сельскохозяйственных земель можно путем размещения водохранилищ в малонаселенных горных и полугорных районах страны на участках рек с большими уклонами дна. Такая политика уже позволила в настоящее время снизить объективный показатель затопления площади на 1 млн. кВт. ч. выработки энергии. В 1950-х годах, когда крупные водохранилища строились на равнинных реках европейской части страны, этот показатель составлял 78 га, а к 1981-1990 гг. он снизился до 6 га. Эта величина примерно сохранится и в будущем. Что касается сельскохозяйственных подтопленных земель, то они из дальнейшего использования не исключаются, а могут быть использованы в качестве сенокосов.

Вредные воздействия водохранилищ на рыбное хозяйство удастся в значительной степени нейтрализовать правильным проектированием и надлежащим уровнем эксплуатации водохранилищ (строительство рыбоводных заводов, нерестно-выростных хозяйств, рыбоводных каналов до перекрытия русла и т.д.). Переход от рыболовства к рыбоводству позволил на некоторых водохранилищах уже сегодня достичь высоких показателей рыбопродуктивности.

Сегодня ставится задача строительства водохранилищ нового поколения, которые наносят минимальный ущерб природе, но одновременно и компенсируют эти потери путем решения острых социальных и других жизненно важных вопросов регионов, где они строятся. Так, например, при разработке проектов водохранилищ ГЭС на Дальнем Востоке в них предусматривается ввод в строй жилья, посадки леса и даже создание национальных парков. Очень важно сейчас проводить последовательную политику по упорядочению экологической обстановки на водохранилищах гидроэлектростанций. Следует сразу отметить, что эта проблема затрагивает всех водопользователей.

Серьезный ущерб водохранилищам наносят не столько природные процессы такие, как заиление, переработка берегов, изменение температуры воды и т.п., но и деятельность человека. Из антропогенных факторов можно выделить следующие:

- высокие темпы загрязнения водохранилищ сточными водами промышленных и бытовых объектов;
- смыв удобрений с непомерно приблизившихся к урезу воды сельскохозяйственных территорий;
- загрязнение воды транспортными средствами, особенно при перевозке нефтепродуктов, и др.

Решение проблемы заключается, в первую очередь, в организации очистки сточных вод, проведении агротехнических мероприятий и т.п. В тоже время необходимы и гидротехнические мероприятия: рациональное регулирование режима уровней и течений в водохранилищах, организация их промывов, ликвидация мелководий и т. д. Необходимо активно решать вопрос о ликвидации леса в ложе водохранилища и качественной подготовке будущей чаши водохранилища к затоплению.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

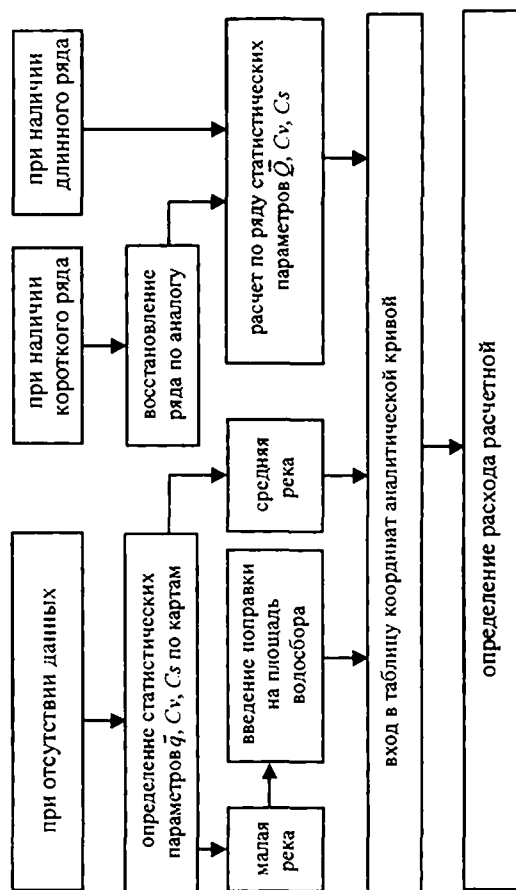
1. В каких отраслях хозяйства наиболее активно используются водные ресурсы?
2. Что представляет собой водохозяйственный баланс?
3. Что называется водохранилищем?
4. Каковы основные предпосылки создания водохранилищ?
5. Назовите типы водохранилищ по их генезису и их характерные черты.
6. Каковы основные параметры водохранилища, определяющие его размеры?
7. Основные виды регулирования стока водохранилищами, их сущность и применение.
8. В чем проявляются прямые воздействия водохранилищ на окружающую среду?
9. В чем заключаются косвенные воздействия водохранилищ на окружающую среду?
10. Как изменяется гидрологический режим водотока при регулировании речного стока водохранилищами?
11. Назовите основные направления и способы уменьшения неблагоприятных последствий создания водохранилищ.

ЛИТЕРАТУРА

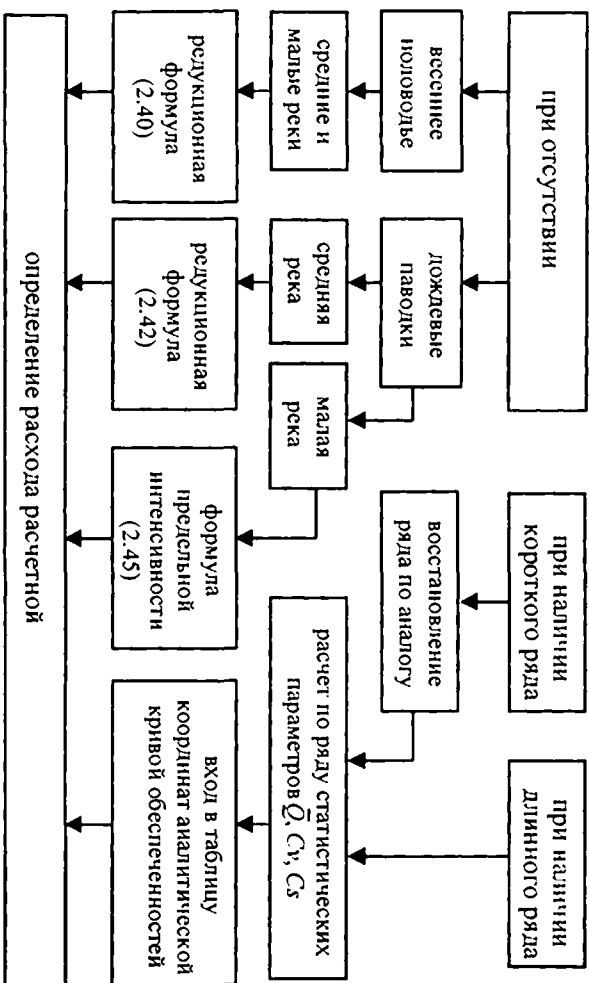
1. *Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д.* Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 366 с.
2. *Арсеньев Г. С., Иваненко А. Г.* Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. – СПб.: Гидрометеиздат, 1993. – 272 с.
3. *Бефани Н. Ф., Калинин Г. П.* Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 390 с.
4. *Богословский Б. Б., Самохин А. А. и др.* Общая гидрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 422 с.
5. *Владимиров А. М.* Гидрологические расчеты. – СПб.: Гидрометеиздат, 1990. – 365 с.
6. *Владимиров А. М., Дружинин В. С.* Сборник задач и упражнений по гидрологическим расчетам. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 208 с.
7. *Георгиевский Ю. М.* Краткосрочные гидрологические прогнозы. – Л.: Изд. ЛПИ (ЛГМИ). 1982. – 100 с.
8. *Дружинин В. С., Сикан А. В.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. – СПб.: Изд. РГГМУ. 2001. – 168 с.
9. *Карасев И. Ф., Васильев А. В., Субботина Е. С.* Гидрометрия. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 375 с.
10. *Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик.* – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 447 с.
11. *Самохин А. А., Соловьева Н. Н., Догановский А. М.* Практикум по гидрологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 296 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Блок-схема расчета среднегодовых расходов воды

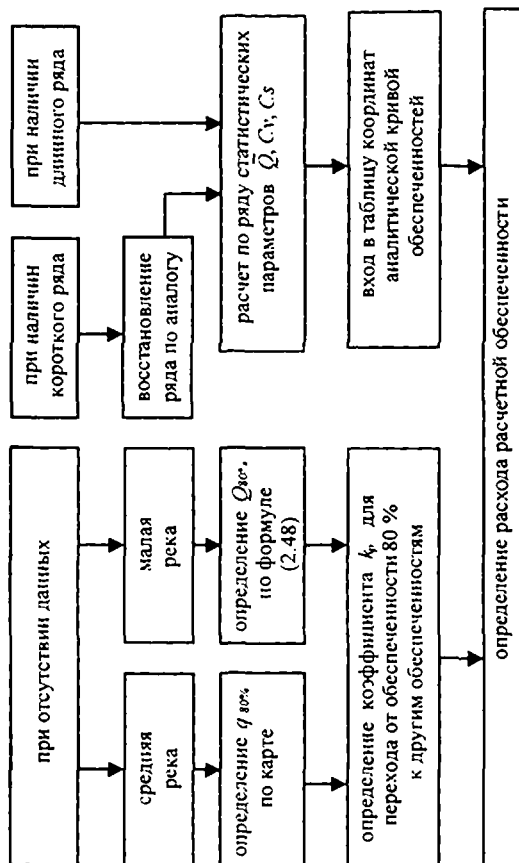


Блок-схема расчета максимальных расходов воды



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Блок-схема расчета минимальных 30-суточных расходов воды (летних или зимних)



СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОСНОВЫ ГИДРОЛОГИИ СУШИ И ГИДРОМЕТРИИ	5
1.1. Общие сведения	5
1.1.1. Краткие сведения из истории гидрологии	5
1.1.2. Круговорот воды на земном шаре	7
1.2. Водосбор водного объекта	9
1.3. Основные морфометрические характеристики речного водосбора	11
1.4. Уравнение водного баланса речного бассейна	13
1.5. Исток и устье реки	14
1.6. Река и речная сеть	14
1.7. Речная долина и русло реки	18
1.7.1. Типы речных долин	20
1.8. Продольный профиль реки	21
1.9. Водное сечение	23
1.10. Основные характеристики речного стока	24
1.11. Источники питания рек	25
1.12. Фазы водного режима	27
1.13. Скорости течения воды и их распределение по живому сечению	30
1.14. Методы измерения скоростей течения рек	33
1.15. Методы определения расходов воды	34
1.16. Наблюдения за уровнями и методы их обработки	36
1.17. Связь расходов и уровней воды	37
1.18. Речные наносы	40
1.18.1. Энергия и работа рек	40
1.18.2. Формирование речных наносов	41
1.18.3. Основные характеристики речных наносов	42
1.18.4. Распределение мутности рек на территории России.....	44
1.19. Русловые процессы	44
1.20. Гидрохимический режим рек	48
1.21. Гидрология озер	49

1.21.1.	Основные определения	49
1.21.2.	Происхождение и строение озерных котловин	50
1.21.3.	Основные части озера и озерного дна	53
1.21.4.	Основные морфометрические характеристики озера.....	55
1.21.5.	Крупнейшие озера земного шара	57
2.	ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ	62
2.1.	Общие положения	62
2.2.	Основные гидрометеорологические характеристики, используемые в инженерных гидрологических расчетах ...	63
2.3.	Расчет гидрологических характеристик при разном объеме гидрометрической информации	67
2.3.1.	Расчет гидрологических характеристик при наличии длин- ного ряда гидрометрических наблюдений	68
2.3.2.	Расчет гидрологических характеристик при ограниченности данных гидрометрических наблюдений ...	74
2.3.3.	Расчет гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений	75
2.4.	Построение и использование разностных интегральных кривых	76
2.5.	Расчет нормы годового стока	78
2.5.1.	Расчет нормы годового стока при отсутствии данных гид- рометрических наблюдений	79
2.6.	Расчет среднегодовых расходов различной обеспеченности	83
2.6.1.	Расчет среднегодовых расходов различной обеспеченности при отсутствии данных гидрометрических наблюдений	83
2.7.	Расчет максимальных расходов воды весеннего половодья и дождевых паводков	84
2.7.1.	Основные типы формул, используемых для расчета макси- мального стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений	85
2.7.2.	Расчет максимальных расходов воды весеннего половодья при отсутствии данных гидрометрических наблюдений	92
2.7.3.	Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии данных гидрометрических наблюдений	94

2.8.	Расчет минимальных расходов воды	97
2.8.1.	Расчет минимальных расходов воды при отсутствии данных гидрометрических наблюдений	99
2.9.	Расчет внутригодового распределения стока	101
2.9.1.	Расчет внутригодового распределения стока методом реального года	103
2.10.	Расчет стока наносов	110
3.	ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ	116
3.1.	Классификация и виды гидрологических прогнозов.....	116
3.2.	Оценка методов и оправдываемости гидрологических прогнозов	119
3.3.	Краткосрочные прогнозы расходов и уровней рек	121
3.3.1.	Метод тенденции	121
3.3.2.	Метод соответственных уровней	124
3.3.3.	Прогноз стока по данным о запасах воды в русловой сети ...	127
3.4.	Краткосрочные прогнозы ледовых явлений	130
3.4.1.	Характерные фазы ледообразования и вскрытия ледового покрова на реках, озерах и водохранилищах	130
3.4.2.	Прогноз даты появления льда	133
3.4.3.	Прогноз даты вскрытия рек	135
3.4.4.	Прогноз даты начала дрейфа льда на озерах и водохранилищах	138
3.5.	Долгосрочные прогнозы	139
3.5.1.	Долгосрочный прогноз характеристик весеннего половодья.....	139
3.5.2.	Долгосрочный прогноз стока рек и притока воды в водохранилища в период межени	141
3.5.3.	Долгосрочные прогнозы ледовых явлений	142
4.	ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	147
4.1.	Общие положения	147
4.2.	Водохозяйственные балансы и принципы их составления...	148
4.3.	Водохранилища и их хозяйственное значение	155

4.3.1.	Определение и типы водохранилищ	155
4.3.2.	Виды регулирования стока водохранилищами и их основные характеристики	161
4.3.3.	Влияние водохранилищ на гидрологический режим водо- токов и природу прилегающих территорий	168
ЛИТЕРАТУРА		176
ПРИЛОЖЕНИЯ		177
1.	Блок-схема расчета среднегодовых расходов воды	177
2.	Блок-схема расчета максимальных расходов воды	178
3.	Блок-схема расчета минимальных расходов воды	179

Учебное издание

Вадим Георгиевич Орлов

Александр Владимирович Сикан

Основы инженерной гидрологии

Учебное пособие

Редакторы И. Г. Максимова
О. С. Крайнова

ЛР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 17.07.02	Формат 60х90/16	Бумага офсетная
Печать офсетная.	Печ. л. 11,75	Тираж 500 экз.

РГГМУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр. 98.
Отпечатано ООО «АСпринт».