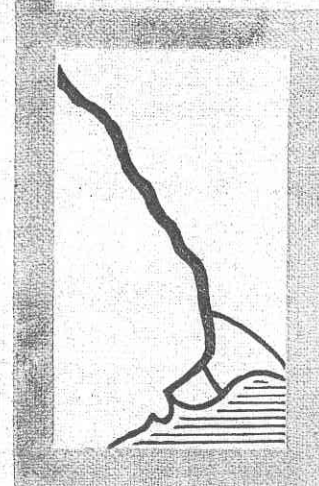




ГИДРОЛОГИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

А. Н. ИВАНОВ
Т. А. НЕГОВСКАЯ

**ГИДРОЛОГИЯ
И РЕГУЛИРОВАНИЕ
СТОКА**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «КОЛОС»
Москва — 1970

От издательства

Книга написана по программе, утвержденной Главным управлением высшего и среднего сельскохозяйственного образования МСХ СССР, и является учебным пособием для студентов гидромелиоративных вузов и факультетов. Она может быть рекомендована и специалистам проектных и эксплуатационных водохозяйственных организаций.

Книга состоит из двух частей: «Гидрология» и «Регулирование стока».

Первая часть написана кандидатом технических наук Т. А. Неговской, вторая — кандидатом технических наук А. Н. Ивановым.

Отзывы о книге и пожелания просим направлять по адресу: Москва, К-31, ул. Дзержинского, 1/19, издательство «Колос».

ВВЕДЕНИЕ

1. Предмет гидрологии. Наука, изучающая закономерности распределения и движения вод земного шара, количественные и качественные изменения их в результате взаимодействия вод с окружающей средой (поверхностью земли и воздушной оболочкой), называется гидрологией. Иначе можно сказать, что это наука о режиме вод земного шара.

Гидрология является отраслью геофизики — общей науки о физических процессах, происходящих в различных слоях нашей планеты: гидросфере, твердой и газообразной оболочке земного шара. Поскольку гидросфера представляет собой отдельные объекты, имеющие географические границы, гидрология относится также к циклу географических наук.

В соответствии с разделением поверхностных вод земного шара на две группы гидрология подразделяется на: океанологию (гидрологию морей и океанов) и гидрологию вод суши.

Последняя разрослась в обширную науку и включает потамологию (науку о реках), лимнологию (озероведение), тельматологию (болотоведение), гляциологию (науку о ледниках).

Гидрология, как и любая другая отрасль естествознания, в своих исследованиях использует методы описания, измерения, анализа и обобщения. Исходя из методов изучения вод, гидрология делится на:

гидрографию, дающую общее описание водных объектов (географическое положение, размер, режим, местные условия);

гидрометрию, изучающую методы определения различных характеристик водных объектов (скоростей течения, уровней воды, расходов воды и наносов и т. д.);

общую гидрологию, изучающую физическую сущность и закономерности гидрологических явлений;

инженерную гидрологию, разрабатывающую методы гидрологических расчетов и прогнозов.

2. Значение гидрологии в решении водохозяйственных проблем. Гидрология имеет тесную связь с метеорологией, геоморфологией, почвоведением, геологией и другими науками, изучающими атмосферу и гидросферу земного шара. Например, общий интерес для гидрологии,

геоморфологии и почвоведения представляют происходящие на земной поверхности процессы размыва (эрозии) и отложения (аккумуляции) наносов. Гидрология связана с гидравликой: речная гидравлика является составной частью как гидрологии, так и гидравлики. Но особенно близка гидрология к гидротехнике и мелиорации.

Велика роль гидрологии в решении водохозяйственных проблем. Наиболее важные вопросы, которые решает современная гидрология, это: 1) оценка водных запасов в связи с требованиями проектов использования водных ресурсов; 2) установление расчетных величин расходов воды (максимальных, минимальных и др.) при проектировании сооружений; 3) расчет испарения с проектируемых водохранилищ и с поверхности речных бассейнов; 4) исследование вопросов формирования русел рек; 5) характеристика температурного и ледового режимов рек и озер; 6) прогнозы основных элементов гидрологического режима (уровней, расходов, вскрытия и замерзания); 7) учет влияний, оказываемых сооружением на водный поток, для определения вероятных условий, в которых будет работать сооружение.

В нашей стране ведется грандиозное гидротехническое строительство. Решение всех проблем, связанных с использованием водных ресурсов, начинается с гидрологического изучения водных объектов.

Проектированию гидроэлектростанций, водохранилищ или других гидротехнических сооружений всегда предшествуют гидрологические расчеты, в результате которых определяют годовые, месячные или сезонные, максимальные и минимальные расходы воды и т. д. Гидрологический расчет — одна из основных частей каждого водохозяйственного проекта.

3. Краткие исторические сведения. Гидрология как самостоятельная наука сформировалась лишь в конце прошлого столетия. Однако исследование вод началось очень давно. Водные объекты с древних времен играли большую роль в жизни народов. На берегах крупных рек строились города, по рекам проходили торговые пути.

Наиболее древние гидрометрические наблюдения (за уровнями р. Нила) обнаружены в Египте около 4000 лет назад.

На территории СССР начало водомерных наблюдений относится к первому тысячелетию до нашей эры. В это время на рр. Зеравшане, Амударье и Мургабе были установлены различные приспособления для распределения воды на оросительных системах.

В России водомерные наблюдения также имеют большую давность. В записях русских летописцев XV и XVI вв. отмечались такие явления, как вскрытие рек и их замерзание, наводнения и паводки, описание некоторых путей сообщения.

В середине XVII в. в Москве велись ежедневные наблюдения за состоянием погоды и уровнем воды на р. Москве. Изучением рек в те времена у нас занимались землепроходцы, которые обследовали многие реки Сибири; в России стали появляться гидроэнергетические установки, особенно на Урале в связи с развитием горнозаводского дела.

Инженерные исследования рек, озер и водоемов начались со времени Петра I. Развитие промышленности, расширение торговли, по-

требность в обороне страны вызвали необходимость улучшения водных путей сообщения.

В 1703—1709 гг. были проведены изыскания и построена Вышневолоцкая система, соединяющая Волгу с Балтийским морем. Первые изыскания будущего Мариинского водного пути (теперь Волго-Балтийский), построенного в 1719—1731 гг., и строительство Ладозских каналов были проведены при личном участии Петра I. При нем впервые в России был измерен расход воды Волги у Камышина (1700 г.), а на р. Неве у Петропавловской крепости установлен первый водомерный пост (1715 г.). Несколько позднее водомерные наблюдения велись на Ладозском и Валдайских озерах, на уральских прудах. Было начато строительство соединительного водного пути между Волгой и Доном, но не там, где он теперь построен, а в верховьях Дона.

Большую работу по изучению рек производила Академия наук, созданная в 1724 г. В 1760 г. в географическом департаменте академии М. В. Ломоносов организовал исследования вскрытия и замерзания рек, весенних половодий.

В 1767 г. начало оформляться Главное управление водяных коммуникаций, основными задачами которого были исследования рек с целью судоходства.

В первой половине XIX в. улучшается аппаратура гидрометрических измерений, получает развитие техника звукового измерения глубин. Вторая половина XIX в. характеризуется широкими гидрологическими исследованиями.

Планомерное изучение русских рек и озер относится к 1874 г., когда при Министерстве путей сообщения была создана навигационно-описная комиссия (НОК). Эта комиссия действовала в течение 20 лет; ее работы имеют большое значение как в изучении гидрографии нашей страны, так и в развитии методов гидрометрии. В то время описные партии организовали около 500 водомерных постов, а на ряде рек вели измерение скоростей течения и определение расходов воды.

Одновременно с изучением рек для целей судоходства с 1873 г. развивались исследования рек, озер и болот в целях использования их для сельскохозяйственных мелиораций (орошения и осушения). Были организованы научные экспедиции по различным вопросам гидрологии: по осушению болот Полесья (1873—1898 гг.), экспедиция И. И. Жилинского по орошению на юге России (1880—1891 гг.), экспедиция А. А. Тилло по исследованию источников главнейших рек европейской России (1894—1903 гг.) и др. Крупнейший русский климатолог и географ А. И. Воейков в работе «Климаты земного шара и в особенности России», вышедшей в 1884 г., впервые сформулировал положение, что реки — это продукт климата, и дал климатическую классификацию рек.

В конце XIX в. большое развитие получили исследования, связанные с изучением механизма речного потока, движения наносов и формирования речного русла. В 1897 г. появилась работа крупного гидротехника-практика и пытливого ученого В. М. Лохтина «Механизм речного русла», которая дает право считать Лохтина основоположником гидрологии речного русла.

В начале XX в. проведены исследования по различным вопросам гидрологии: появились работы Э. М. Ольдекопа по испарению с поверхности речных бассейнов (1911 г.), Н. Е. Жуковского о движении воды на повороте реки (1914 г.) и о заилинии (1915 г.), Н. Е. Долгова по теории стока ливневых вод (1916 г.) и др.

Все эти труды не потеряли своего значения и до настоящего времени. Однако бурное развитие гидрологических исследований и гидрологии как единой науки начинается в нашей стране только после Великой Октябрьской революции. Социалистическая система хозяйства ставит вопрос о комплексном использовании водных объектов для целей судоходства, энергетики, водоснабжения, мелиорации и т. д.

Важным событием в истории изучения водных ресурсов страны было учреждение в 1919 г. Российского, ныне Государственного, гидрологического института (ГГИ), в задачи которого входило объединение всех водных исследований в СССР.

В 1920 г. по инициативе В. И. Ленина принято историческое решение об электрификации России (план ГОЭЛРО). Выполнение этого плана потребовало всестороннего изучения естественного режима водоемов. В период с 1919 г. проведены крупнейшие водные исследования рр. Волхова, Свири, Москвы, Урала, Днепра, Волги, Амударьи и др.

Большое значение в развитии стационарных исследований рек имело учреждение в 1929 г. Гидрометеорологического комитета при Совете Народных Комиссаров СССР, который в 1933 г. был преобразован в Центральное управление Гидрометеорологической службы, а в 1936 г. — в Главное управление гидрометслужбы (ГУГМС). Это способствовало резкому возрастанию сети гидрологических станций, установлению единой методики работ, улучшению качества гидрологических исследований.

В 1924 и 1928 гг. были созваны I Всероссийский и II Всесоюзный гидрологические съезды, на которых рассматривались вопросы водного баланса и речного стока, морфометрии речного русла, измерительных приборов и гидробиологии.

Для развития гидрологических исследований большую роль сыграло грандиозное гидротехническое строительство довоенных лет: Волховская, Свирская и Днепровская ГЭС, Беломорско-Балтийский канал, канал имени Москвы и др.

В послевоенный период партия и правительство принимали ряд решений, связанных с водохозяйственным строительством, выполнение которых требовало дальнейшего развития гидрологии. Особенно сильно возросла роль гидрологических исследований после майского (1966 г.) Пленума ЦК КПСС в связи с расширением мелиорации земель.

В 1957 г. состоялся III Всесоюзный гидрологический съезд, на котором были рассмотрены достижения в области советской гидрологии за 30 лет, прошедших после II съезда, и выработано направление дальнейших гидрологических исследований.

В последнее десятилетие особое внимание уделяется вопросам водного и теплового балансов. В проблеме испарения во всех его видах

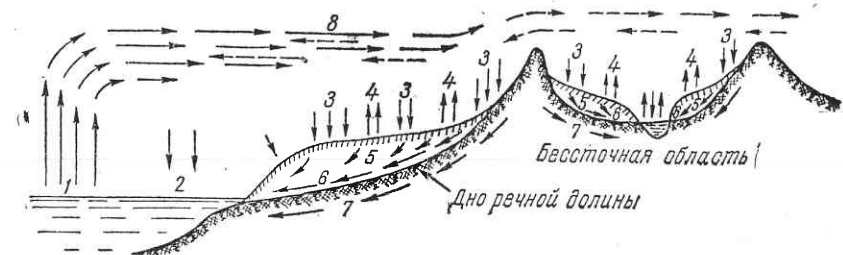


Рис. 1. Схема круговорота воды в природе:

1 — испарение с поверхности океана; 2 — осадки на поверхность океана; 3 — осадки на поверхность суши; 4 — испарение с поверхности суши; 5 — поверхностный и подземный стоки в реку; 6 — речной сток в океан (бессточное море); 7 — подземный сток в океан (бессточное море); 8 — влагообмен между сушей и океаном через атмосферу.

наряду с экспериментальным изучением развивается теоретическое направление, основанное на методе турбулентной диффузии. В исследованиях речного стока и его регулирования находит все большее применение теория вероятностных процессов.

Развитие и совершенствование методики гидрологических расчетов дает возможность уточнять существующие нормы по расчету максимальных расходов талых вод при отсутствии или недостаточности гидрометрических данных, по расчету минимального стока, а также по расчету годового стока и его внутригодового распределения.

4. Круговорот воды в природе. Под влиянием солнечной радиации с поверхности морей и океанов, занимающих 70,8% площади земного шара, ежегодно испаряется огромное количество воды. Испарившаяся влага большей частью конденсируется и возвращается в виде атмосферных осадков в океан, совершив так называемый малый круговорот.

Часть испарившейся с морей и океанов влаги переносится воздушными течениями на сушу, где некоторая часть ее достигает стадии конденсации и выпадает в виде осадков; остальная часть не вступает во влагооборот и выносится через материк снова к океану.

Выпавшие осадки частично стекают по поверхности суши в виде ручьев и рек, частично просачиваются в почву, образуя грунтовые воды, а частично снова испаряются. В конце концов воды, доставленные воздушным течением на сушу, снова достигают океана, завершая так называемый большой круговорот воды в природе. Таким образом, круговорот воды в природе — это непрерывный процесс влагообмена между океаном, атмосферой и сушей (рис. 1).

Небольшая часть водяных паров, поступающих с поверхности океанов, выпадает в виде осадков в бессточные области суши. Здесь отмечаются самостоятельные влагообороты, почти не связанные с общим круговоротом воды в природе. Особенность влагообмена бессточных областей с океаном состоит в том, что вода из бессточных областей попадает туда не путем непосредственного стока, а путем переноса влаги в парообразном состоянии воздушными потоками.

На фоне большого круговорота воды земного шара можно выделить местные или внутриматериковые влагообороты, происходящие в пределах отдельных частей континента. Под внутриматериковым влагооборотом понимается процесс испарения и осаднения внутри материков влаги, переносимой воздушными течениями с океана на сушу. На пути движения воздушных масс в глубь материка процесс испарения — осадки повторяется многократно. Чем больше объем испарения, тем чаще будут происходить такие влагообороты, тем больше количество выпадающих осадков, то есть тем более влажный климат данной территории и тем дальше проникает влага на материк.

Рассмотрим схему внутриматерикового оборота над некоторой территорией. Обозначив количество водяных паров, вошедших в пределы данной территории, Q_1 и выносимых за ее пределы — Q_2 , осадки — x и испарение — E , получим:

$$Q_2 = Q_1 - x + E. \quad (1)$$

Количество воды, сбрасываемое за пределы рассматриваемой территории в виде речного стока y , в среднем за год равно:

$$y = x - E. \quad (2)$$

С учетом равенства (2) уравнение (1) можно записать так:

$$Q_2 = Q_1 - y. \quad (3)$$

Осадки, выпадающие в пределах рассматриваемой территории, можно разделить на две составляющие: образующиеся из водяного пара, принесенного на территорию извне («внешние» осадки, x_b) и образовавшиеся из водяного пара, возникшего в результате местного испарения («местные» осадки, x_m), то есть

$$x = x_b + x_m. \quad (4)$$

Тогда уравнение (2) можно представить в виде:

$$x_b + x_m = y + E. \quad (5)$$

Задача расчета внутриматерикового оборота состоит в выяснении отношения $\frac{x_b}{x_m}$, так как в нем проявляется роль местного для данной территории испарения в образовании осадков.

Для оценки интенсивности влагооборота нужно знать так называемый коэффициент влагооборота $\frac{x}{x_b}$, показывающий, сколько раз пришедший извне водяной пар выпадает в виде осадков, до того как воздушные потоки и речной сток вынесут его за пределы территории.

Атмосферные течения проносят над материком огромные количества влаги со столь большими скоростями, что значительная часть не успевает сконденсироваться и выносится снова на океан. Так, расчеты К. И. Кашина и Х. П. Погосьяна показали, что количество влаги, переносимой атмосферой за год в пределах европейской части СССР, равно в среднем 8500 км^3 , осадки составляют 3120 км^3 , а испарение 2190 км^3 . Тогда сток рек в среднем равен $3120 - 2190 = 930 \text{ км}^3$. Таким образом,

большая часть влаги проносится над территорией европейской части СССР транзитом и лишь 11% идет на сток.

На основании проведенных расчетов М. И. Будыко и О. А. Дроздов пришли к выводу, что из общего количества влаги над территорией европейской части СССР водяные пары местного происхождения составляют в среднем всего 13%, а остальные 87% — это влага с морей и океанов.

Рассмотренные вопросы имеют большое значение для прогнозирования тех изменений, которые могут произойти во влагообороте в результате водохозяйственных мероприятий на рассматриваемой территории.

5. Водный баланс земного шара. Изложенная схема круговорота воды в природе может быть выражена уравнением водного баланса, которое определяет связь между приходом и расходом влаги для всего земного шара. Приходной частью баланса являются осадки, расходной — испарение и сток.

Примем следующие обозначения:

x_o — средние годовые осадки, выпадающие на поверхность океанов;

x_c — средние годовые осадки, выпадающие на поверхность суши;

E_o — среднее годовое испарение с поверхности океанов;

E_c — среднее годовое испарение с поверхности суши;

y — сток рек.

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

$$E_o = x_o + y. \quad (6)$$

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

$$E_c = x_c - y. \quad (7)$$

Объединив эти уравнения, получим общее уравнение водного баланса для земного шара в виде:

$$E_o + E_c = x_o + x_c. \quad (8)$$

то есть сумма испарения воды с поверхности морей, океанов и суши равна сумме осадков, выпавших на поверхность морей, океанов и суши.

На основании исследований, проведенных различными учеными (Э. Л. Брикнером, А. А. Каминским, А. В. Вознесенским, М. И. Львовичем), получена количественная оценка элементов водного баланса земного шара. По расчетам М. И. Львовича (1961 г.), эти величины, выраженные в км^3 в год, составляют:

$$\begin{aligned} E_o &= 447\,200; & E_c &= 65\,400; \\ x_o &= 411\,600; & x_c &= 101\,000; \\ y &= 35\,600. \end{aligned}$$

Таким образом, ежегодный сток со всего земного шара составляет $35,6 \text{ тыс. км}^3$. Если распределить этот объем равномерно по всей площа-

ди суши 117106 км², то получится слой стока, равный 304 мм. Общий объем воды на земном шаре около 1330 млн. км³. Следовательно, в речном стоке участвуют всего около 0,003% от общего количества воды на нашей планете.

По исследованиям Государственного гидрологического института (1967 г.), величины элементов водного баланса Советского Союза за год составляют: осадки 11 694 км³, испарение 7336 км³, сток 4358 км³. При равномерном распределении указанных объемов в виде слоя получаем: осадки 531 мм, испарение 333 мм и сток 198 мм.

Таким образом, из общего количества атмосферных осадков (11694 км³), выпадающих в течение года, более половины испаряется, остальная часть стекает.

Распределение стока по территории Советского Союза неравномерно. Наибольшие значения речного стока наблюдаются в северных, северо-западных и восточных областях СССР: бассейны Баренцова, Белого, Балтийского, Берингова, Охотского и Японского морей. В этих областях сосредоточено около 80% годового стока.

Территории средней полосы, занимающие по площади четвертую часть страны с наиболее развитым хозяйством, имеют около 18% водных ресурсов.

Низкие значения стока наблюдаются в южных и особенно юго-восточных районах европейской территории Союза, а также в бассейне Аральского моря и ряде районов Средней Азии. На эту площадь, составляющую четвертую часть страны, приходится всего лишь 2% годового стока.

6. Единицы измерения стока. Характеристики стока делятся на размерные и безразмерные.

К первой группе относятся расход воды, объем, модуль, слой и норма стока.

Расходом называется количество воды, протекающее через поперечное сечение реки в одну секунду. Расход выражается обычно в м³/сек и может быть среднесуточный, среднемесячный, среднесезонный, среднегодовой, а также средний многолетний.

Объем стока W — это количество воды, протекающее через данное сечение реки за некоторый промежуток времени, то есть

$$W = QT, \quad (9)$$

где T — число секунд в рассматриваемом периоде.

Объем стока, выраженный в м³, млн. м³ или км³, также может быть вычислен за любой промежуток времени: сутки, месяц, сезон, год.

Модуль стока M показывает, сколько воды стекает с единицы площади водосбора в 1 сек, и выражается в л/сек с 1 км².

$$M = \frac{Q \cdot 10^3}{F} \text{ л/сек с } 1 \text{ км}^2, \quad (10)$$

где 10^3 — переходный коэффициент от м³/сек в л/сек;

F — площадь водосбора, км².

Модуль стока, как и расход, может быть средний за сутки, месяц, сезон, год и средний многолетний.

Слой стока h , выраженный в мм, получается в результате деления объема стока на площадь водосбора:

$$h = \frac{W}{F \cdot 10^3} \text{ мм}, \quad (11)$$

где W — объем стока, м³;

F — площадь водосбора, км².

Между высотой слоя стока и модулем стока существует следующая зависимость:

$$h = 31,5 M. \quad (12)$$

Норма стока — это средняя величина годового стока за многолетний период с неизменными физико-географическими условиями. Норму стока можно выразить через любую характеристику стока: расход, модуль, слой или объем стока.

$$Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}; \quad M_0 = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n}; \quad h_0 = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n}; \quad W_0 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{n}. \quad (13)$$

В этих выражениях в числителе — величины годового стока, в знаменателе — число наблюдений. Длительность наблюдений (n) должна быть такой, при которой среднее арифметическое значение стока является практически достаточно устойчивым.

К безразмерным характеристикам стока относятся модульный коэффициент и коэффициент стока.

Модульный коэффициент K — это отношение величины стока за какой-то период к среднему многолетнему:

$$K = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{M_i}{M_0} = \frac{h_i}{h_0} = \frac{W_i}{W_0}, \quad (14)$$

где Q_i, M_i, h_i, W_i — величины стока за данный период;

Q_0, M_0, h_0, W_0 — средние многолетние значения стока.

Модульные коэффициенты могут быть годовые, сезонные, месячные и т. д.

Коэффициентом стока η называется отношение высоты слоя стока h к количеству выпавших в бассейне осадков x за один и тот же период:

$$\eta = \frac{h}{x}. \quad (15)$$

Коэффициент стока показывает, какая часть выпавших осадков стекает. Вычисляют его чаще для многолетнего периода.

Глава I. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ГИДРОЛОГИИ

Основная цель расчетов стока заключается в получении данных, характеризующих сток в будущем, когда начнут действовать проектируемые мероприятия. Основанием для такого прогноза являются дан-

ные о стоке и определяющих его факторах за прошедшее время. Имея результаты непосредственных измерений стока за длительный период и основываясь на закономерностях явлений стока, с достаточной степенью вероятности можно получить необходимые характеристики ожидаемого стока. Однако в практике такими данными располагают не всегда, поэтому приходится составлять стоковые характеристики при незначительном количестве непосредственных наблюдений или даже при полном их отсутствии. В таких случаях пользуются различными косвенными методами расчета стока (метод гидрологической аналогии, эмпирические формулы, методы математической статистики).

Математическая статистика — это наука, занимающаяся изучением закономерностей массовых явлений. Приемы математической статистики, основанные на теории вероятностей, имеют очень широкое применение не только в гидрологии, но и в ряде других дисциплин.

§ 1. Статистические характеристики ряда

Событие, которое при наличии соответствующего комплекса условий может наступить, а может и не наступить, называется случайным событием.

Случайные события появляются под влиянием большого количества взаимодействующих причин, произвести анализ которых не представляется возможным. Следует различать случайные события и случайные величины. Например, появление в реке каждый год одного наибольшего расхода воды в период весеннего половодья не является случайным. Но та или иная величина этого расхода, которая наблюдается в каждом отдельном году, относится к категории случайных величин.

Совокупность случайных величин называется статистическим рядом. Статистический ряд характеризует изменение случайной величины во времени. Гидрологические ряды в большей части можно считать статистическими.

Основными статистическими характеристиками ряда являются следующие величины:

- 1) средняя арифметическая величина $\bar{x}$;
- 2) коэффициент вариации C_v и
- 3) коэффициент асимметрии C_s .

Возьмем для примера ряд гидрологических элементов и рассмотрим его характеристики. Предположим, есть данные по среднегодовым расходам воды у определенного створа реки за период n лет. Обозначим расход за каждый год через $x_1, x_2, \dots, x_n$. Первая характеристика этого ряда — средняя арифметическая величина:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (16)$$

где n — число членов ряда.

Установим степень разбросанности или изменчивости членов ряда. Отклонение каждого члена ряда от среднего значения равно:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (17)$$

Так как отклонения имеют разные знаки, то сумма их равна нулю и среднее отклонение $\Delta \bar{x} = 0$.

Чтобы избавиться от влияния знаков при отклонениях, возведем все отклонения в квадрат; сумму квадратов отклонений разделим на число членов ряда и из этого выражения извлечем квадратный корень. Полученная величина называется средним квадратическим отклонением:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (18)$$

Если число членов ряда n меньше 30, то среднее квадратическое отклонение можно определить по формуле:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (19)$$

Среднее квадратическое отклонение — это абсолютная характеристика изменчивости ряда.

Для возможности сравнения отдельных статистических рядов в отношении их изменчивости необходимо выразить величину σ в долях от $\bar{x}$, то есть разделить среднее квадратическое отклонение на среднее арифметическое значение данного ряда.

Относительное среднее квадратическое отклонение от среднего арифметического значения ряда называется коэффициентом вариации:

$$C_v = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}. \quad (20)$$

Коэффициент вариации очень важная характеристика изменчивости ряда; его часто определяют в расчетах стока.

Для удобства гидрологических расчетов статистические ряды часто выражают не в абсолютных значениях, а в относительных, то есть применяют безразмерные ряды. Для этого каждый член размерного ряда делят на среднее арифметическое:

$$\frac{x_1}{\bar{x}}, \frac{x_2}{\bar{x}}, \frac{x_3}{\bar{x}} \dots \frac{x_n}{\bar{x}}.$$

Получают ряд модульных коэффициентов: $K_1 K_2 K_3 \dots K_n$.

Безразмерный ряд имеет два основных свойства: 1) сумма членов безразмерного ряда равна числу членов ряда ($\sum_{i=1}^n K_i = n$); 2) среднее арифметическое значение безразмерного ряда равно единице ($\bar{K} = 1$).

При замене в формуле (18) величины $\frac{x_i}{\bar{x}}$ на K получают значение коэффициента вариации безразмерного ряда:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K-1)^2}{n}}. \quad (21)$$

Если число членов ряда $n < 30$, то коэффициент вариации определяется по формуле:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K-1)^2}{n-1}}. \quad (22)$$

В выражениях (19) и (21) знаменатель n заменяют на $n-1$ потому, что при коротких рядах средняя арифметическая величина, необходимая при использовании формул (19) и (22), вычисляется с меньшей точностью. Для уменьшения ошибки, происходящей вследствие различия истинного и вычисленного значения $\bar{x}$, и необходима указанная замена знаменателя.

Третьей характеристикой статистического ряда является коэффициент асимметрии ряда C_s . Ряд называется симметричным, если положительные и отрицательные отклонения членов ряда от среднего арифметического его значения повторяются одинаково часто. Характеристикой асимметричности ряда служит коэффициент асимметрии. Для размерного ряда коэффициент асимметрии

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma_x^3}. \quad (23)$$

Для безразмерного ряда

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (K-1)^3}{nC_v^3}. \quad (24)$$

§ 2. Понятие о вероятности

Вероятность — это мера возможности появления того или иного события, в частности различных гидрологических явлений или их характеристик. Вероятность наступления какого-нибудь события равна отношению числа случаев, благоприятствующих появлению рассматриваемого события (m), к числу всех равновероятных случаев (n):

$$P = \frac{m}{n}. \quad (25)$$

Например, имеются данные по среднегодовым расходам какой-то реки за 100 лет. В течение 30 лет расходы были от 100 до 70 м³/сек, в течение

50 лет — от 70 до 40 м³/сек и 20 лет — от 40 до 10 м³/сек. Тогда вероятность того, что расход воды должен иметь значение от 100 до 70 м³/сек, равна $\frac{30}{100} = 0,3$; вероятность появления расходов от 70 до 40 м³/сек — $\frac{50}{100} = 0,5$ и для расходов в пределах от 40 до 10 м³/сек — $\frac{20}{100} = 0,2$.

Предположим теперь, что в этом 100-летнем ряду все расходы имеют значение от 40 до 10 м³/сек. Тогда вероятность наступления такого расхода будет $\frac{100}{100} = 1$; если же в ряду такие расходы вовсе отсутствуют, то вероятность появления их равна $\frac{0}{100} = 0$.

Таким образом, вероятность колеблется в пределах от 0 до 1. Если вероятность события равна нулю, оно совершенно невозможно, а если единице — оно достоверно.

Явления, которые не могут появиться вместе, называются несовместимыми. В данном случае расходы первой группы (100—70 м³/сек) и второй группы (70—40 м³/сек) или второй и третьей групп (40—10 м³/сек) не могут появиться в один и тот же год (они несовместимы).

Независимыми называют события в тех случаях, когда вероятность появления каждого из них не находится в какой-либо зависимости от появления других событий.

Рассмотрим основные действия над вероятностями.

Теорема сложения вероятностей говорит, что вероятность появления одного из несовместимых событий (события A или события B), без указания какого именно, равна сумме вероятностей появления каждого из этих событий в отдельности:

$$P(A+B) = P(A) + P(B). \quad (26)$$

В нашем примере вероятность появления расхода первой или второй группы равна: $0,3+0,5=0,8$; вероятность наступления расхода второй группы или третьей: $0,5+0,2=0,7$; вероятность наступления расхода первой, второй или третьей группы $0,3+0,5+0,2=1$.

Таким образом, из теоремы сложения вероятностей вытекает, что если несовместимые события единственно возможны, то сумма их вероятностей равна единице.

Теорема умножения вероятностей гласит, что вероятность совместного наступления обоих событий A и B при их независимости равна произведению вероятности события A на вероятность события B :

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B). \quad (27)$$

В рассматриваемом примере вероятность наступления вначале расхода первой группы, а затем второй в соответствии с выражением (27) будет: $0,3 \cdot 0,5 = 0,15$; вероятность наступления подряд двух расходов первой группы: $0,3 \cdot 0,3 = 0,09$ и т. д.

Если события не независимы, то нужно знать, какова вероятность появления события B при условии, что событие A произошло. Такая веро-

ятность называется условной и обозначается $P(B/A)$. В этом случае вероятность совпадения событий B после A выразится через

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B/A). \quad (28)$$

Пусть $A_1, A_2, \dots, A_n$ — несовместимые события и событие B может осуществляться только с одним из них. Тогда вероятность события B равна сумме произведений вероятностей события A на условную вероятность события B , то есть

$$P(B) = P(A_1) \cdot P(B/A_1) + P(A_2) \cdot P(B/A_2) + \dots + P(A_n) \cdot P(B/A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \cdot P(B/A_i). \quad (29)$$

Эта формула называется формулой полной вероятности.

§ 3. Правило сигм

Возьмем какой-нибудь гидрологический ряд:

$$x_1 x_2 x_3 \dots x_n.$$

Определим статистические характеристики взятого ряда:

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

и предположим, что ряд близок к симметричному, то есть $C_s \approx 0$.

Представим ряд графически, откладывая по оси ординат значения x , по оси абсцисс — время T (рис. 2). Через точку $\bar{x}$ на оси ординат

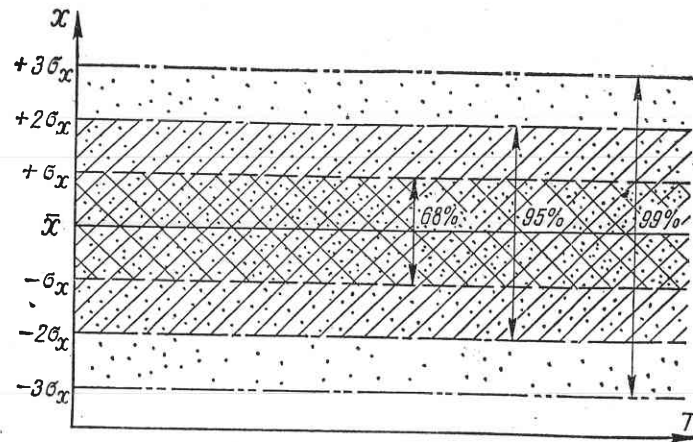


Рис. 2. Схема к пояснению правила сигм.

проведем горизонтальную линию через весь график. Отложим вверх и вниз от $\bar{x}$ величину среднеквадратического отклонения σ_x и через эти точки проведем горизонтальные линии. Доказано, что в заштрихованной полосе между $\pm\sigma_x$ находится более 68% всех членов ряда (x). Следовательно, если ряд близок к симметричному, то более 68% членов ряда отклоняются от $\bar{x}$ на величину, не превышающую $\pm\sigma_x$.

Предположим, что число членов ряда 100, а количество членов, отклоняющихся от $\bar{x}$ на величину $\pm\sigma_x$, 68. Тогда вероятность отклонения x_i от $\bar{x}$ на величину $\pm\sigma_x$, или вероятность ошибки $\pm\sigma_x$, равна:

$$P_1 = \frac{68}{100} = 0,68.$$

Если отложить на графике вверх и вниз от $\bar{x}$ величину $\pm 2\sigma_x$ и провести через эти точки горизонтальные линии, то между ними уже будет находиться более 95% всех членов ряда, то есть вероятность ошибки $\pm 2\sigma_x$ составит:

$$P_2 = \frac{95}{100} = 0,95.$$

Между линиями, проведенными через точки $\pm 3\sigma_x$, находится примерно 99% всех членов ряда; 99% членов ряда могут отклоняться от $\bar{x}$ не более чем на $\pm 3\sigma_x$. Вероятность ошибки $\pm 3\sigma_x$ будет:

$$P_3 = \frac{99}{100} = 0,99.$$

Это положение в математической статистике известно как правило о трех сигмах и формулируется так: если значение какой-нибудь величины имеет примерно нормальное распределение около среднего арифметического, то более 99% общего числа значений отклоняется в ту и другую сторону от $\bar{x}$ не более чем на утроенное среднеквадратическое отклонение ($3\sigma_x$), или:

$$-3\sigma_x < (x_i - \bar{x}) < +3\sigma_x. \quad (30)$$

Это неравенство определяет величину расхождения x_i от $\bar{x}$, пределы колебания x_i по сравнению с $\bar{x}$. Выражение (30) можно записать так:

$$(x_i - 3\sigma_x) < \bar{x} < (x_i + 3\sigma_x). \quad (31)$$

Правая часть этого неравенства — $(x_i + 3\sigma_x)$ — величина всегда положительная. В гидрологии $\bar{x}$ — величина тоже обязательно положительная (расход воды, модуль стока, осадки и т. д.). Для того чтобы в выражении (31) $\bar{x}$ было положительной величиной, необходимо, чтобы была положительной левая часть неравенства, то есть

$$x_i - 3\sigma_x \geq 0,$$

или

$$x_i \geq 3\sigma_x.$$

Тогда

$$\frac{x_i}{\sigma_x} \geq 3. \quad (32)$$

Полученное соотношение выражает правило трех сигм для гидрологических рядов. Если условие (32) выполняется, значит, x_i найден достоверно с вероятностью ошибки 0,99, или x_i отклоняется от $\bar{x}$ не более чем на $\pm\sigma_x$ в 99 случаях из 100.

§ 4. Определение погрешностей в вычислении статистических характеристик ряда

В гидрологии различные характеристики определяют обычно по ряду наблюдаемых величин (стока, осадков и т. д.), который является лишь частью многолетнего ряда, каким в действительности не располагают. Поэтому все статистические характеристики ряда — $\bar{x}$, C_v и C_s — по приведенным выше формулам можно вычислить с различной степенью точности в зависимости от количества членов ряда. Так, сред-

нее арифметическое $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ определится точно только в том случае, если n стремится к бесконечности; в остальных случаях $\bar{x}$ определяется с какой-то погрешностью.

В практических расчетах стока очень важно знать, с какой ошибкой получаются эти величины при той или иной длине ряда наблюдений.

В теории вероятности получены формулы, по которым можно установить, с какой точностью вычислены $\bar{x}$, C_v и C_s .

Абсолютную ошибку среднего арифметического с вероятностью 0,68 определяют по формуле:

$$\Delta \bar{x}_{0,68} = \pm \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}, \quad (33)$$

σ_x — среднее квадратическое отклонение;
 n — число членов ряда.

Для того чтобы получить относительную ошибку $\bar{x}$ в процентах, выражение (33) следует разделить на $\bar{x}$ и умножить на 100 %. Получим:

$$\bar{E}_{\bar{x}, 0,68} = \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100\%, \quad (34)$$

где C_v — коэффициент вариации.

Для получения величины ошибки $\bar{x}$ с вероятностью 0,99 выражение (34) надо умножить на 3, а для получения ошибки с вероятностью 0,95 — на 2.

Из приведенной формулы (34) видно, что точность нахождения среднего арифметического зависит от числа членов ряда (от длительности

наблюдений) и от степени изменчивости ряда, характеризующейся коэффициентом вариации C_v .

Относительную ошибку коэффициента вариации с вероятностью 0,68 (или среднеквадратическую ошибку) определяют по формуле:

$$E_{C_v, 0,68} = \pm \sqrt{\frac{1+C_v^2}{2n}} 100\%. \quad (35)$$

В гидрологических расчетах полученное значение ошибки по выражению (35) сравнивают с допустимой ошибкой, указанной в нормах по проектированию. Если вычисленная ошибка превышает допустимую, значит, ряд наблюдений короткий, недостаточный для определения C_v по теоретическим формулам (20 и 21).

Относительную ошибку коэффициента асимметрии с вероятностью 0,68 можно вычислить по формуле:

$$E_{C_s, 0,68} = \pm \frac{1}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n}} \sqrt{1+6C_s^2+5C_v^2} 100\%. \quad (36)$$

Подсчеты по формуле (36) показывают, что для надежного определения коэффициента асимметрии C_s необходимо иметь ряд, состоящий более чем из 100 членов. Столь продолжительные наблюдения есть только по нескольким рекам. Поэтому пользоваться теоретическими формулами (23, 24) для определения C_s не приходится. В гидрологических расчетах параметр C_s , как будет показано далее, находят косвенными приемами.

§ 5. Корреляция

При исследовании гидрологических явлений часто возникает необходимость в установлении зависимости между соответственными значениями различных величин, в сравнении двух и более рядов.

Происходящие в природе явления настолько сложны и многообразны, что полный учет всех факторов, влияющих на эти явления, оказывается затруднительным. Например, высота весеннего половодья зависит не только от запасов воды в снеге, но и от количества весенних осадков, предварительного увлажнения почвы, наличия или отсутствия ледяной корки на почве. В связи с невозможностью учета всех этих факторов зависимость между максимальными уровнями воды половодья и запасами воды в снеге имеет приближенный характер.

Если величина функции y зависит не только от величины переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$, но и от других причин, то связь между y и $x_1, x_2, \dots, x_n$ называется неточной или корреляционной связью в отличие от точной или функциональной. При наличии функциональной зависимости каждому значению аргумента x соответствует одно, вполне определенное значение функции y . При корреляционной же зависимости каждому значению аргумента может соответствовать несколько значений функции.

К функциональным зависимостям относятся все законы физики, химии и т. д. Связи, наблюдающиеся между гидрологическими явле-

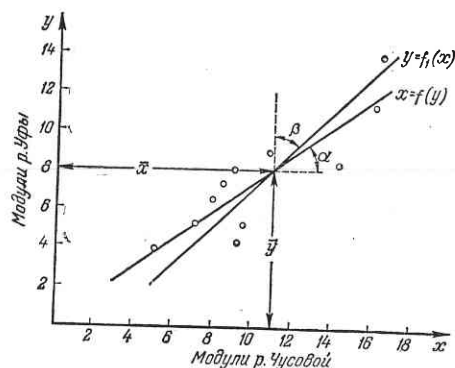


Рис. 3. Зависимость между среднегодовыми модулями стока рр. Чусовой и Уфы.

фиге соответствует определенная точка (рис. 3). Из графика видно, что все нанесенные точки не ложатся на одну прямую или кривую линию, они располагаются некоторой полосой. В общем с увеличением модуля стока одной реки увеличивается и модуль стока другой, однако точного соответствия в изменениях модулей стока обеих рек не наблюдается. При одном и том же значении модуля стока р. Уфы модуль стока р. Чусовой может иметь различные величины. И наоборот, при одинаковом модуле стока р. Чусовой на р. Уфе могут наблюдаться различные модули. Таким образом, зависимость между годовыми модулями стока этих рек является корреляционной.

ТАБЛИЦА 1

Годы	Модули стока, л/сек км²		Годы	Модули стока, л/сек км²	
	р. Чусовая	р. Уфа		р. Чусовая	р. Уфа
1921	7,1	5,3	1926	16,3	14,0
1922	7,9	6,6	1927	16,0	11,4
1923	9,0	8,1	1928	10,8	9,0
1924	9,2	4,4	1929	8,5	7,4
1925	14,2	8,4	1930	9,7	5,2

Корреляционную зависимость можно выразить аналитически, то есть подобрать уравнения, связывающие x и y , корреляционно. При изучении речного стока преимущественно встречаются корреляционные зависимости, имеющие прямолинейный характер; графически они выражаются прямыми линиями. Прямая линия, проведенная с таким расчетом, чтобы сумма квадратов отклонений от нее ординат y отдельных точек была бы наименьшей, даст наиболее вероятные значения y , отвечающие заданным значениям x . Эта прямая называется линией регрессии y по x . Прямая, соответствующая наименьшей сумме квадратов отклонений от нее абсцисс x , называется линией регрессии x по y

и дает наиболее вероятные значения x , отвечающие заданным значениям y . Линии регрессии пересекаются в одной точке, соответствующей средним значениям переменных x и y .

Обозначим угловой коэффициент линии x по y через α , линии y по x через β . Чем шире полоса точек на графике, тем менее точная связь между x и y , тем меньше угол α и угол β . За меру связи между двумя рядами принимают величину

$$r = \sqrt{\tan \alpha \tan \beta}. \quad (37)$$

Величина r называется коэффициентом корреляции. Из выражения (37) следует, что если $\alpha=0$ или $\beta=0$, то коэффициент корреляции $r=0$; тогда линии регрессии перпендикулярны друг другу, точки разбросаны по всему полю графика и связь между x и y отсутствует. Если линии регрессии совпадают, связь превращается в функциональную; тогда $\beta=90-\alpha$ и $\tan \beta = \tan (90-\alpha) = \cot \alpha$, а коэффициент корреляции

$$r = \sqrt{\tan \alpha \cot \alpha} = 1. \quad (38)$$

Следовательно, коэффициент корреляции по абсолютной величине колеблется от 0 до 1; r может иметь знак плюс или минус. Положительное значение коэффициента корреляции указывает на то, что оба признака x и y возрастают или убывают одновременно. При отрицательном значении коэффициента корреляции с увеличением x значение y уменьшается.

Таким образом, величина коэффициента корреляции изменяется в пределах от +1 до -1. Чем ближе r к единице, тем теснее связь между x и y . В гидрологических расчетах связь считается достаточно тесной, если $r \geq 0,80$.

Значение коэффициента корреляции удобнее вычислить по формуле:

$$r = \frac{\sum (\Delta x \Delta y)}{\sqrt{\sum \Delta x^2 \sum \Delta y^2}}, \quad (39)$$

или

$$r = \frac{\sum (\Delta x \Delta y)}{(n-1) \sigma_x \sigma_y}. \quad (40)$$

Среднеквадратическое отклонение коэффициента корреляции приближенно определяют по формуле:

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (41)$$

Формулы (39) и (40) справедливы только при большом числе членов ряда ($n > 20$). При малом числе членов коэффициент корреляции может оказаться случайным и, следовательно, не быть показателем наличия хорошей связи. Достоверность коэффициента корреляции, найденного по небольшому количеству данных, можно установить по способу, предложенному английским ученым Р. А. Фишером. При этом способе

коэффициент r заменяется величиной z , функционально связанной с r соотношением:

$$z = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}, \quad (42)$$

или

$$z = 1,1513 \lg \frac{1+r}{1-r}. \quad (43)$$

Замена r на z удобна тем, что величина z при любом значении r от $+1$ до -1 имеет распределение, очень близкое к нормальному, и поэтому к оценке найденного значения z можно применить правило трех сигм. Среднеквадратическое отклонение величины z определяют по формуле:

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{n-3}}. \quad (44)$$

Если отношение $\frac{z}{\sigma_z} \geq 3$, то величина z найдена достоверно с вероятностью ошибки 0,99, то есть в 99 случаях из 100 ошибка z не превышает $\pm 3\sigma_z$.

В соответствии с «Указаниями по определению расчетных величин годового стока рек и его внутригодового распределения» (СН 371—67) оценку достоверности (неслучайности) коэффициента корреляции в гидрологических расчетах можно приближенно проводить с помощью коэффициента достоверности K_d , равного отношению коэффициента корреляции к его среднему квадратическому отклонению:

$$K_d = \frac{|r| \sqrt{n-1}}{1-r^2}, \quad (45)$$

где $|r|$ — абсолютная величина коэффициента корреляции;
 n — число членов ряда.

При $K_d < 1$ связь коррелируемых величин отсутствует; при $3 > K_d > 1$ имеется тенденция связи этих величин; при $K_d > 3$ значение коэффициента корреляции считается достоверным.

Прямолинейная корреляция аналитически выражается следующими уравнениями:

$$y - \bar{y} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - \bar{x}), \quad (46)$$

$$x - \bar{x} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} (y - \bar{y}), \quad (47)$$

где $\bar{x}, \bar{y}$ — средние значения x и y ;

r — коэффициент корреляции;

σ_x, σ_y — среднеквадратические отклонения ряда x и ряда y .

Коэффициенты $r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ и $r \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ определяют угол наклона прямой регрессии к оси ординат и оси абсцисс и называются коэффициентами регрессии.

Уравнения (46) и (47), связывающие x и y корреляционно, имеют следующие свойства:

1) определение y по x возможно только по уравнению (46); определение x по y — по уравнению (47);

2) оба уравнения имеют одну общую точку с координатами $\bar{x}$ и $\bar{y}$. Абсолютные ошибки с вероятностью 0,68 в определении x и y по уравнениям (46) и (47) находят по следующим формулам:

$$\Delta E_{y, 0,68} = \pm \sigma_y \sqrt{1-r^2}; \quad (48)$$

$$\Delta E_{x, 0,68} = \pm \sigma_x \sqrt{1-r^2}. \quad (49)$$

Для получения ошибок в определении x и y по корреляционным уравнениям с вероятностью 0,99 надо правые части выражений (48) и (49) утроить.

§ 6. Применение метода корреляции к определению норм стока

Метод корреляции широко используется в гидрологических расчетах. При небольшом количестве гидрометрических данных о годовом стоке (за период 10—15 лет) норму стока можно определить методом корреляции по аналогии с другой рекой. Сущность метода состоит в следующем: например, есть данные о годовом стоке в створе какой-то реки за $n=10$ лет (это могут быть среднегодовые расходы, модули, слои стока). Обозначив эти данные через y , получим ряд:

$$y_1 y_2 y_3 \dots y_{10}.$$

С целью удлинения короткого ряда фактических наблюдений выбираем бассейн, аналогичный по физико-географическим условиям изучаемому, но в котором есть данные по стоку за многолетний период. Допустим, в аналоге имеются данные за $N=25$ лет. Обозначив их через x , получим такой ряд:

$$x_1 x_2 x_3 \dots x_{10} \dots x_{25}.$$

Теперь есть два ряда: короткий — y и длинный — x . На основании имеющихся параллельных наблюдений, в нашем случае за $n=10$ лет, устанавливаем, действительно ли существует связь между годовым стоком в обоих бассейнах. Для этого определяем коэффициент корреляции r и устанавливаем его достоверность.

Если r найден достоверно и по абсолютной величине он больше 0,80, значит, между стоком в изучаемом бассейне и бассейне-аналоге существует достаточно тесная связь, то есть аналог выбран правильно.

Выражаем эту связь с помощью корреляционного уравнения:

$$y - \bar{y}_{10} = r_{10} \frac{\sigma_{y, 10}}{\sigma_{x, 10}} (x - \bar{x}_{10}). \quad (50)$$

Пользуясь уравнением (50), можно найти норму стока тремя приемами.

Подставляя в уравнение (50) последовательно значения x от x_{11} до x_{25} , можно удлинить ряд y до 25 членов. По удлиненному ряду годовых величин вычисляем норму стока как среднее арифметическое:

$$\bar{y}_0 = \bar{y}_{25} = \frac{\sum_{i=1}^{25} y_i}{25}.$$

Уравнение (50) можно представить графически. Вычислив норму стока в аналогичном бассейне как

$$\bar{x}_{25} = \frac{\sum_{i=1}^{25} x_i}{25},$$

графически находят соответствующую этому значению x величину нормы стока в изучаемом бассейне, то есть $\bar{y}_{25}$.

Третий прием определения нормы стока по корреляционному уравнению состоит в том, что в уравнение (50) вместо текущих координат x и y подставляют их средние значения за $N=25$ лет, то есть искомую норму стока в изучаемом бассейне ($\bar{y}_{25}$) и норму стока в аналогичном бассейне ($\bar{x}_{25}$):

$$\bar{y}_{25} - \bar{y}_{10} = r_{10} \frac{\sigma_{y, 10}}{\sigma_{x, 10}} (\bar{x}_{25} - \bar{x}_{10}). \quad (51)$$

Из этого уравнения находим норму стока в изучаемом бассейне:

$$\bar{y}_{25} = \bar{y}_{10} + r_{10} \frac{\sigma_{y, 10}}{\sigma_{x, 10}} (\bar{x}_{25} - \bar{x}_{10}).$$

Абсолютную ошибку нормы стока, найденной из уравнения (51), а также по удлиненному ряду, определяют по формуле:

$$\Delta E_{\bar{y}; 0,68} = \pm \frac{\sigma_{y, N}}{\sqrt{N}} \sqrt{1 - \frac{N-n}{n} r^2}, \quad (52)$$

где n — число членов короткого ряда;

N — число членов длинного ряда (продолжительность многолетнего периода);

r — коэффициент корреляции;

$\sigma_{y, N}$ — среднее квадратическое отклонение приведенного к многолетнему периоду ряда (удлиненного ряда y).

Среднее квадратическое отклонение приведенного к многолетнему периоду ряда зависит от коэффициента корреляции r , от средних квадратических отклонений $\sigma_{y, n}$ и $\sigma_{x, n}$, вычисленных по короткому ряду, и от среднего квадратического отклонения длинного ряда $\sigma_{x, N}$. Эту

величину определяют по формуле:

$$\sigma_{y, N} = \frac{\sigma_{y, n}}{\sqrt{1 - r^2 \left(1 - \frac{\sigma_{x, n}^2}{\sigma_{x, N}^2}\right)}}. \quad (53)$$

Коэффициент вариации приведенного к многолетнему периоду ряда, то есть ряда, удлиненного методом корреляции, находят так:

$$C_v, N = \frac{\sigma_{y, N}}{\bar{y}_N}. \quad (54)$$

Глава II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕКАХ

§ 1. Река и ее система

Река, впадающая непосредственно в море или бессточное озеро, называется главной. Реки, впадающие в главную реку, называются притоками первого порядка. Далее следуют притоки второго порядка, третьего и т. д. Совокупность всех рек, впадающих в главную реку, называется речной системой (в плане она имеет вид ветвящегося дерева).

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

Длину реки можно измерить циркулем или курвиметром по карте масштаба 1 : 50 000 или 1 : 100 000.

Густоту речной сети определяют как отношение длины всех рек какой-либо территории к ее площади:

$$D = \frac{\Sigma L}{F}, \quad (55)$$

где ΣL — длина, км;

F — площадь, км².

При таком определении густоты речной сети получается ее среднее значение для рассматриваемой территории. Часто применяют другой способ определения густоты речной сети. Всю рассматриваемую территорию разбивают на ряд равновеликих квадратов с площадью f ; измеряют длину рек в пределах каждого квадрата Σl и вычисляют густоту речной сети в квадрате:

$$d = \frac{\Sigma l}{f}. \quad (56)$$

На основании полученных данных строят линии равной густоты речной сети, называемые изоденсами. Изоденсы характеризуют распределение густоты сети на всей территории. Густота речной сети возрастает с увеличением количества осадков. В районах избыточного увлажнения речная сеть более густая, чем в районах Средней Азии, где норма годовых осадков достигает всего 100—200 мм. Большое значение имеет также распределение осадков в течение года.

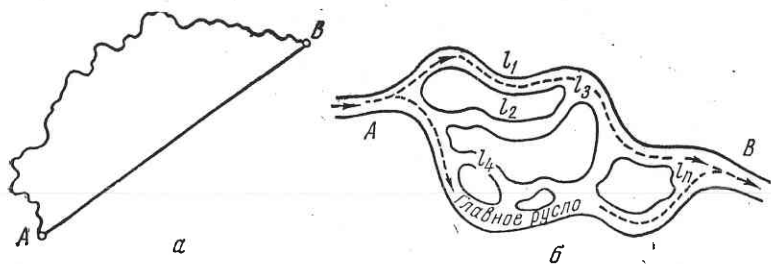


Рис. 4. Извилистость (а) и разветвленность (б) рек.

Если бассейн реки сложен легкопроницаемыми грунтами, то большая часть выпавших осадков просачивается в грунт, вследствие чего наблюдается меньшее развитие гидрографической сети, то есть меньшая густота речной сети.

Непосредственное влияние на густоту речной сети оказывает рельеф местности. С увеличением уклона бассейна усиливается эрозионная способность стекающих вод, меньшая часть воды просачивается, большая часть стекает, что приводит к увеличению густоты речной сети. Кроме того, на образование речной сети оказывает влияние растительный покров, который создает дополнительную шероховатость, уменьшающую скорость движения воды по поверхности суши. Растительный покров уплотняет своей корневой системой грунт — эрозионная способность воды вследствие этого уменьшается. В лесах большее количество талых вод просачивается в почву. Таким образом, растительный покров не способствует развитию речной сети.

Извилистость рек характеризуется коэффициентом, представляющим отношение фактической длины L , определенной с учетом всех извилин, к длине прямой линии l , соединяющей начальный и конечный пункты участка реки, для которого определяется коэффициент извилистости (рис. 4, а):

$$K_{из} = \frac{L}{l}. \quad (57)$$

В пределах широких пойм речные русла часто разветвляются на несколько протоков, то есть рукавов, образующих острова. Степень такой разветвленности выражается отношением суммы длин всех протоков, в том числе и участка главного русла, к длине соответствующего участка главного русла между точками А и В (рис. 4, б). Такое отношение называется коэффициентом разветвленности:

$$K_{разв} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n}{L}. \quad (58)$$

Величину коэффициента разветвленности определяют для подсчета объема промерных работ при исследовании рек, земляных работ при проектировании сооружений и в других случаях.

§ 2. Речной бассейн

Часть земной поверхности, включая толщу почвогрунтов, из которой река или речная система получает водное питание, называется бассейном данной реки или системы.

Бассейн каждой реки включает поверхностный и подземный водосборы. Поверхностный водосбор представляет собой участок земной поверхности, с которой вода поступает в данную речную систему или реку. Подземный водосбор — это часть толщи почвогрунтов, из которых вода поступает в речную сеть. Поверхностный водосбор может не совпадать с подземным. Однако ввиду больших затруднений в определении границы подземного водосбора несовпадение его с поверхностным в практических расчетах не учитывается. Поверхностный водосбор каждой реки отделяется от соседнего водораздельной линией, проходящей по наиболее высоким точкам земной поверхности.

К основным характеристикам речного бассейна относятся площадь, форма, высота и уклон водосбора.

Величина площади водосбора не только определяет водность реки, но и оказывает непосредственное влияние на процессы формирования стока. Площадь водосбора определяют планиметром по карте с горизонталями масштаба 1:50 000 или 1:100 000.

Площадь водосбора каждой реки нарастает по мере продвижения вниз по течению и по мере впадения в нее притоков. Для наглядного представления об изменении площади водосбора от истока к устью строят график нарастания площади водосбора (рис. 5). По горизонталь-

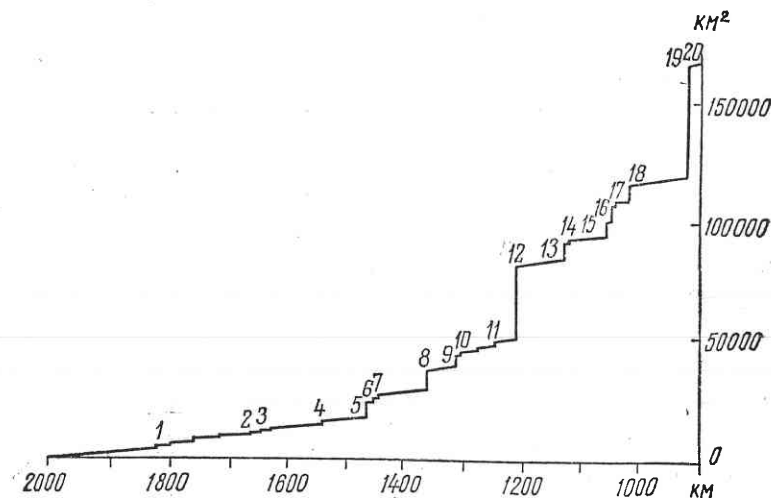


Рис. 5. График нарастания водосборного бассейна р. Камы:
1 — р. Калыч; 2 — р. Волосница; 3 — р. Нырмич; 4 — р. Порыш; 5 — р. Веслена; 6 — р. Лунья; 7 — р. Леман; 8 — р. Коса; 9 — р. Южн. Кельтма; 10 — р. Пильва; 11 — р. Уралка; 12 — р. Вишера; 13 — р. Яппа; 14 — р. Кондос; 15 — р. Иньва; 16 — р. Косьва; 17 — р. Чермос; 18 — р. Обва; 19 — р. Чусовая; 20 — мост железной дороги.

ной оси графика откладывают длину главной реки в выбранном масштабе; по вертикальной оси — площади водосбора главной реки между притоками и площади бассейнов притоков. Наклонные линии на графике выражают постепенное нарастание площади главной реки между притоками. В местах впадения притоков происходит резкое увеличение площади водосбора за счет площади притока.

Форма речного водосбора оказывает влияние на степень одновременности поступления воды к замыкающему створу. Обычно речной водосбор имеет расширенную среднюю часть и более узкие участки у устья и истока, однако встречаются водосборы и самых разнообразных форм.

Форму водосбора реки можно характеризовать коэффициентом асимметрии и коэффициентом развития водораздельной линии. Коэффициент асимметрии выражает степень асимметричности бассейна и определяется по формуле:

$$a = \frac{F_{\text{л}} - F_{\text{п}}}{F_{\text{л}} + F_{\text{п}}}, \quad (59)$$

где $F_{\text{л}}$, $F_{\text{п}}$ — площадь левобережной и правобережной частей водосбора.

Коэффициент развития водораздельной линии m представляет собой отношение длины водораздельной линии S к длине окружности круга s , площадь которого равна площади водосбора F :

$$m = \frac{S}{s}. \quad (60)$$

Так как площадь круга равна площади водосбора, $F = \pi R^2$, то радиус круга, равновеликого площади водосбора, равен:

$$R = \sqrt{\frac{F}{\pi}}.$$

Тогда

$$s = 2\pi R = 2\pi \sqrt{\frac{F}{\pi}} = 2\sqrt{\pi F}.$$

Следовательно, коэффициент развития водораздельной линии можно записать в виде:

$$m = \frac{S}{2\sqrt{\pi F}} = 0,282 \frac{S}{\sqrt{F}}. \quad (61)$$

Высота бассейна имеет значение при изучении режима осадков и стока.

Среднюю высоту бассейна определяют по карте бассейна в горизонталях.

$$H_{\text{ср}} = \frac{f_1 h_1 + f_2 h_2 + \dots + f_n h_n}{F} = \frac{\sum f_i h_i}{F}, \quad (62)$$

где f_i — площадь между горизонталями, м^2 ;

h_i — средняя высота площадки между горизонталями, м ;

F — площадь водосбора, м^2 .

Весьма важной характеристикой бассейна является его уклон. Обычно в расчетах определяют средневзвешенный уклон водосбора, который может быть получен также по карте бассейна в горизонталях.

Пусть одна из горизонталей имеет длину в пределах водосбора l_0 . Рядом расположенная горизонталь имеет длину l_1 . Уклон площадки бассейна между этими горизонталями равен:

$$i_1 = \frac{\Delta H}{b_1}, \quad (63)$$

где ΔH — сечение горизонталей;

b_1 — среднее расстояние между горизонталями.

Площадь бассейна между двумя горизонталями

$$f_1 = \frac{l_0 + l_1}{2} b_1, \quad (64)$$

откуда

$$b_1 = \frac{2f_1}{l_0 + l_1}. \quad (65)$$

Тогда уклон площадки составляет:

$$i_1 = \frac{\Delta H (l_0 + l_1)}{2f_1}. \quad (66)$$

Аналогично находят уклон для каждой площадки между горизонталями. Средневзвешенный уклон для всего бассейна определяют по формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{i_1 f_1 + i_2 f_2 + i_3 f_3 + \dots + i_n f_n}{\sum f_i}. \quad (67)$$

Подставив в это выражение найденное значение i , получают:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\Delta H \left(\frac{l_0 + l_1}{2f_1} \right) f_1 + \Delta H \left(\frac{l_1 + l_2}{2f_2} \right) f_2 + \dots + \Delta H \left(\frac{l_{n-1} + l_n}{2f_n} \right) f_n}{F},$$

или

$$I_{\text{ср}} = \frac{\Delta H (0,5l_0 + l_1 + l_2 + \dots + 0,5l_n)}{F}. \quad (68)$$

§ 3. Речная долина и речное русло

Речными долинами называются неширокие, вытянутые в длину, обычно извилистые, углубления в земной поверхности, характеризующиеся общим уклоном ложа. Речные долины при встрече никогда не пересекаются, а сливаются вместе, образуя одну общую долину.

По происхождению речные долины могут быть эрозионными, тектоническими, вулканическими и ледниковыми. Независимо от основных факторов, вызвавших образование долины, дальнейшее формирование долины происходит под влиянием деятельности текучих вод (эрозии, транспортирования наносов и аккумуляирования их).

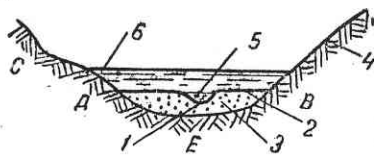


Рис. 6. Поперечный разрез речной долины:

1 — меженное русло; 2 — пойма; 3 — аллювий; 4 — коренной берег; 5 — меженный уровень воды; 6 — уровень высоких вод.

Речная долина в поперечном сечении (рис. 6) ограничена склонами АВ и СД (коренными берегами) и дном или ложем Е. Обычно дно заполняется аллювием, в котором река прорабатывает себе русло. Русло — это часть долины, по которой осуществляется речной сток. Часть русла, по которой течет вода в период межи, называется коренным или меженным руслом. Часть долины, которая периодически затапливается водой при весенних половодьях или паводках, называется пойменным руслом или поймой. В долинах с широким дном в результате воздействия речного потока образуются речные террасы.

Кроме рассмотренной схемы, встречаются и другие формы речных долин. Так, в горной местности долины рек образуют отвесные склоны и узкое дно (каньоны, ущелья).

Ширина долины обычно увеличивается от верховьев рек к их низовьям. Глубина долин изменяется в широких пределах. В равнинных районах долины неглубокие, от нескольких десятков до 200—300 м; в горах глубина долин может достигать до 2—4 км.

§ 4. План реки

Речное русло в плане имеет извилистую форму. Образование излучин объясняется наличием в водном потоке циркуляционных, винтообразных течений и неустойчивостью речного русла.

Извилистая форма русла характерна для равнинных рек, протекающих в сравнительно легко размываемых грунтах.

С очертанием русла в плане связано распределение его глубин. Размывающая деятельность текущих вод на закруглениях реки обычно больше, чем на прямых участках. Глубокие части русла реки, соответствующие изогнутым в плане участкам русла, называются плесами. Относительно прямолинейные, с меньшими глубинами, переходные участки от одного плеса к другому называются перекатами. Таким образом, река представляет собой чередование плесов и перекатов.

Распределение глубин в русле характеризуется линиями равных глубин, то есть изобатами. План русла в изобатах строят на основании данных промерных работ. Все измеренные глубины приводят к одному — срезочному — уровню и по ним аналогично построению горизонталей проводят изобаты.

На плане русла в изобатах видно, что перекат находится между замкнутыми линиями больших глубин. Если линия, соединяющая самые глубокие точки дна реки (фарватер), плавно переходит от одного плеса к другому (рис. 7, а), то перекат называют нормальным.

Если плесы сдвинуты относительно друг друга в поперечном направлении, а фарватер представляет собой искривленную линию, получается сдвинутый перекат (рис. 7, б).

В равнинных реках с легкоподвижным дном наблюдаются некоторые закономерности между глубинами и очертаниями реки в плане. Эти зависимости установлены в конце прошлого столетия французским инженером Л. Фаргом в результате натуральных и лабораторных исследований:

- 1) максимальный размыв (наибольшая глубина русла) наблюдается не в вершине изгиба, а смещается вниз по течению на одну четвертую часть длины плеса плюс перекат;
- 2) плавному изменению кривизны соответствует плавное же изменение глубин;
- 3) чем больше кривизна, тем больше и глубина плеса;
- 4) с увеличением длины кривой при данной ее кривизне глубина сначала возрастает, а потом убывает.

Зависимости Фарга подтверждаются только в тех случаях, когда река проходит в однородных грунтах. Тем не менее значение их велико, так как они дают основную ориентировку в подходе к изучению процессов формирования русла реки.

§ 5. Продольный профиль реки

Продольный профиль реки характеризуется профилями дна речной долины и водной поверхности.

На основании обширных исследований рек СССР выделяется три основных типа продольных профилей речного дна: профиль равновесия, прямолинейный и сбросовый (рис. 8).

Профиль равновесия отличается значительной крутизной в верховьях рек и меньшими уклонами в низовьях. В начальной стадии формирования продольного профиля реки интенсивно происходят процессы размыва ввиду относительно большого возвышения потока реки над базисом эрозии. Базис эрозии — это горизонтальная плоскость, проходящая через самую низкую точку речной системы, ниже которой поток не может углублять свое ложе. Для рек, впадающих в море или озеро, базисом эрозии является их уровень, а для притоков — самый низкий уровень реки в месте впадения притока. Очевидно, что с понижением базиса эрозии

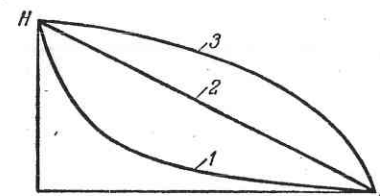


Рис. 8. Типы продольных профилей рек:
1 — профиль равновесия; 2 — прямолинейный;
3 — сбросовый.

процессы размыва будут усиливаться, а с повышением — замедляться. В дальнейшем при устойчивом положении базиса эрозии происходит процесс выравнивания продольного профиля.

С течением времени процесс выравнивания продольного профиля достигает состояния, при котором наступает равновесие между эрозией (размывом), транспортом продуктов размыва и аккумуляцией (отложением). Продольный профиль, соответствующий этому состоянию, и называется профилем равновесия (графически он напоминает гиперболу). Это основной тип горных, предгорных и больших равнинных рек.

Прямой тип профиля характеризуется относительно равномерными уклонами, графически он близок к прямой линии. Такой профиль имеют малые равнинные реки.

Сбросовой профиль характеризуется малыми уклонами в верховьях и большими — в устьевой части реки; графически напоминает параболу. Это объясняется главным образом геологическими условиями образования долины. Сбросовой профиль встречается весьма редко (в основном на реках Карельской АССР и Кольского полуострова).

Если на продольном профиле реки взять две точки A и B , расположенные на расстоянии L друг от друга и имеющие отметки H_1 и H_2 , то разность отметок $\Delta H = H_1 - H_2$ даст падение реки на участке AB . Отношение падения (ΔH) к длине участка (L) называется уклоном реки:

$$I = \frac{H_1 - H_2}{L} = \frac{\Delta H}{L} \quad (69)$$

Уклоны выражают в десятичных дробях и в промилле. Например, средний уклон р. Волги от г. Горького до устья р. Камы $I = 0,00005$, что в промилле соответствует $0,05\text{‰}$ (то есть на 1 км длины реки падение в среднем составляет $0,05\text{ м}$); у р. Енисея от Минусинска до Красноярска средний уклон $I = 0,00024$ (падении $0,24\text{ м/км}$); у р. Ангары на Падунском пороге $I = 0,0159$ (падении $15,9\text{ м/км}$).

Общий характер продольного профиля реки на большом ее протяжении мало зависит от местных переломов профиля дна, а также от колебания уровня воды, так как влияние этих факторов значительно меньше, чем изменение высотных элементов самого профиля. Но если взять на реке сравнительно небольшой участок и на нем детально рассмотреть местные уклоны, то окажется, что продольный профиль представляет собой кривую сложного вида, изменяющуюся в зависимости от уровня воды в реке.

Рассмотрим, как изменяются уклоны водной поверхности, а в связи с этим и уклоны дна при различных уровнях воды в реке. Допустим, что в некоторый момент расход в реке очень мал и даже равен нулю (река пересохла). Тогда продольный профиль водной поверхности представится в виде ряда разобщенных прудов, то есть плесовых участков (линия 1—1, рис. 9), среди которых будут пересохшие перекаты. С поступлением воды в русло она начнет заполнять углубления (плесы), переливаться через гребень переката. На плесе уклон малый, на перекате большой (линия 2—2). При дальнейшем увеличении расхода воды (по-

вышении уровня) уклоны на перекате будут уменьшаться, а на плесе соответственно возрастать; профиль водной поверхности изменится (линия 3—3). При еще большем увеличении расхода воды (уровня) в некоторый момент произойдет сглаживание водной поверхности (вид 4—4). Дальнейшее повышение уровня воды влечет за собой обратное расположение уклонов, то есть над плесами уклоны станут больше, чем над перекатами (линия 5—5). Это объясняется тем, что при высоких уровнях, а следовательно, при больших глубинах и скоростях на распределение уклонов существенное влияние оказывают не перегибы в профиле дна, а очертание русла в плане. Плесы соответствуют закруглению русла в плане, где движение воды испытывает добавочное сопротивление, тем большее, чем больше скорость потока. Для преодоления на плесах этого добавочного сопротивления (отсутствующего на перекатах) требуется увеличение уклона.

Изменение уклонов вызывает изменение скоростей течения на плесах и перекатах и соответственно процессов размыва и отложения наносов. При низких уровнях, когда наблюдаются повышенные уклоны на перекатах, происходит размыв перекатов и повышение дна плесов; при высоких уровнях, наоборот, размываются плесы и нарастают перекаты. Таким образом, непрерывные изменения продольного профиля водной поверхности, происходящие под влиянием перегибов в профиле дна или очертания русла в плане, вызывают частные изменения в профиле дна речного русла.

Изложенный характер изменения уклонов водной поверхности наблюдается до тех пор, пока уровень воды не выходит из пределов коренного русла. При выходе потока на пойму распределение частных уклонов устанавливается не профилем дна и изгибами русла, а очертанием берегов долины: там, где долина суживается, наблюдается больший поверхностный уклон, а там, где она расширяется, меньший.

§ 6. Поперечный профиль реки

Поперечное сечение русла — весьма важная характеристика реки, определяющая пропускную способность русла, распределение скоростей, уклонов, направления течения и другие гидравлические элементы потока.

Поперечное сечение русла реки имеет ряд размерных и безразмерных морфометрических характеристик. К первым относятся:

площадь живого сечения, ширина реки, средняя глубина поперечного сечения и гидравлический радиус.

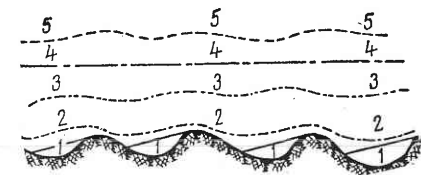


Рис. 9. Схема изменения уклонов при различных уровнях:

1—4 — при низких уровнях воды; 5 — при высоких.

Живым сечением называется поперечное сечение реки, заполненное водой. Для выяснения формы поперечного сечения проводят промерные работы, на основании которых вычерчивают профиль живого сечения, затем аналитическим способом или планиметрированием определяют его площадь. Вычислив площади живых сечений при разных уровнях $H_1, H_2, \dots, H_n$, строят кривую зависимости площади от уровня $\omega = f(H)$. Эта кривая называется кривой площадей и представляет большой практический интерес.

Ширина реки B зависит от высоты уровня и определяется по поверхности воды между урезами берегов.

Среднюю глубину поперечного сечения определяют по формуле:

$$h_{\text{ср}} = \frac{\omega}{B}. \quad (70)$$

Гидравлический радиус R представляет собой частное от деления площади живого сечения на длину смоченного периметра

$R = \frac{\omega}{\chi}$. Для широких и неглубоких рек длина смоченного периметра приблизительно равна ширине реки: $\chi \approx B$. Тогда гидравлический радиус равен:

$$R = \frac{\omega}{\chi} \approx \frac{\omega}{B} = h_{\text{ср}}. \quad (71)$$

В практических расчетах для равнинных рек часто принимают $R = h_{\text{ср}}$.

К безразмерным морфометрическим характеристикам поперечного сечения относятся некоторые параметры.

Параметр α_h представляет отношение средней глубины к максимальной:

$$\alpha_h = \frac{h_{\text{ср}}}{h_{\text{макс}}}. \quad (72)$$

Для рек $\alpha_h \approx 0,67$. Такое соотношение соответствует параболе, то есть профиль живого сечения реки близок к параболе. Параболическая форма русла наблюдается в тех случаях, когда оно сложено из несвязных грунтов. Если река проходит в связных грунтах, то ее профиль близок к эллипсу.

Другой параметр учитывает неравномерность распределения глубин по ширине реки:

$$\beta_* = \frac{1}{\omega \sqrt{h_{\text{ср}}}} \int_0^B h^{3/2} dB. \quad (73)$$

Для прямолинейного сечения $\beta_* = 1$; в других случаях $\beta_* > 1$. Для правильных криволинейных профилей и профилей полигонального очертания β_* определяется теоретически. В общем случае для вычисления параметра β_* требуется построение вспомогательной эпюры $h^{3/2}$ по ширине реки.

Применительно к речному потоку параметр β_* можно определить по приближенной формуле Г. В. Железнякова:

$$\beta_* = (2 - \alpha_h)^P, \quad (74)$$

где $P = 1,1 - 1,3 \alpha_h + 0,2 \alpha_h^2$.

Параметр В. Г. Глушкова представляет собой отношение средней глубины к корню квадратному из ширины реки:

$$\Gamma = \frac{h_{\text{ср}}}{\sqrt{B}}. \quad (75)$$

§ 7. Поперечный уклон реки

Поперечные уклоны воды в реках появляются весной во время прохождения паводка. При резком подъеме уровня воды скорости течения увеличиваются в средней части русла быстрее, чем у берегов. С увеличением скорости в средней части уменьшается давление, поэтому в середине реки образуется выпуклость, то есть появляется поперечный уклон.

Поперечные уклоны могут возникать под действием ветра. Если ветер дует поперек или под некоторым углом к направлению потока, то он, естественно, гонит к одному из берегов поверхностные частицы воды, образуя перекося поверхности воды в поперечном направлении, или поперечный уклон.

Однако более регулярно поперечные уклоны воды в реках появляются на изгибах рек под действием центробежных сил и сил, вызываемых вращением земли (Кориолисово ускорение). Рассмотрим действие этих сил в отдельности.

Под действием центробежной силы на закруглениях реки поток прижимается к выпуклому берегу, где уровень воды становится выше, чем у вогнутого, то есть образуется поперечный уклон (рис. 10). Предположим, что все частицы потока движутся с одинаковой скоростью u . Тогда на любую точку потока будут действовать сила тяжести g (отнесенная к единице массы) и центробежная сила $f_{\text{ц}}$. Центробежная сила, отнесенная к единице массы, выражается формулой:

$$f_{\text{ц}} = \frac{\bar{u}^2}{r_{\text{к}}}, \quad (76)$$

где $\bar{u}$ — скорость частицы;

$r_{\text{к}}$ — радиус кривизны.

Найдем равнодействующую центробежной силы и силы веса. Из гидравлики известно, что для равновесия системы необходимо, чтобы поверхность воды была перпендикулярна к равнодействующей силе. Тогда угол между равнодействующей силой и силой веса равен углу, составленному наклонной плоскостью воды и горизонтальной линией, так как эти углы образованы взаимно перпендикулярными сторонами. В таком случае выражение поперечного уклона, образованного центро-

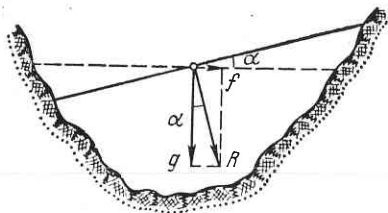


Рис 10. Поперечный уклон на изгибе реки.

бежной силой, можно записать так:

$$I'_{\text{поп}} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{f_{\text{ц}}}{g} = \frac{\bar{u}^2}{r_{\text{к}} g} \quad (77)$$

Превышение уреза одного берега над другим

$$\Delta h = B \operatorname{tg} \alpha = B \frac{\bar{u}^2}{r_{\text{к}} g} \quad (78)$$

Поперечный уклон всегда в несколько раз меньше продольного уклона реки.

Рассмотрим образование уклона под действием сил, вызываемых вращением земли (ускорение Кориолиса). Под действием Кориолисова ускорения движущаяся масса воды отклоняется в северном полушарии вправо, в южном — влево, по направлению движения. Это ускорение выражается формулой:

$$f_{\text{к}} = 2\omega \bar{u} \sin \varphi, \quad (79)$$

где ω — угловая скорость вращения земли;

φ — географическая широта местности.

По аналогии с предыдущим поперечный уклон, вызываемый ускорением Кориолиса, будет:

$$I''_{\text{поп}} = \operatorname{tg} \beta = \frac{b_{\text{к}}}{g} = \frac{2\omega \bar{u} \sin \varphi}{g} \quad (80)$$

Этот поперечный уклон значительно меньше уклона, образованного действием центробежной силы.

Так как в северном полушарии вектор Кориолисова ускорения отклоняется вправо по направлению движения, то на правый вогнутый берег будет действовать сила $f = f_{\text{ц}} + f_{\text{к}}$, а на левый берег $f' = f_{\text{ц}} - f_{\text{к}}$.

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

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

Глава III. РЕЖИМ РЕК. ОЗЕРА И БОЛОТА

§ 1. Колебания уровней воды в реках

Уровнем воды в реке называется положение свободной водной поверхности над некоторой условной плоскостью.

Колебания уровней воды в реках зависят главным образом от изменения расхода воды: с повышением расхода воды уровни возрастают, с уменьшением расхода понижаются. Изменения расходов воды обуславливаются типом питания реки.

Кроме того, колебания уровней воды могут быть вызваны такими факторами, как зарастаемость русла водной растительностью, деформация русла, ледовые и ветровые явления. В устьях рек, впадающих в моря, периодические изменения положения уровня происходят в результате приливов и отливов. Естественный режим уровня нарушается искусственными гидротехническими и мелиоративными сооружениями.

Иногда колебания уровней воды могут происходить под действием одновременно многих факторов; в таком случае создается сложный уровенный режим.

Изменение водности потока, основного фактора уровенного режима определяет сезонный характер колебания уровней воды. Если у реки наибольшие расходы весной и малые летом, то соответственно и уровни воды высокие весной, низкие летом. Амплитуда колебания уровней воды, то есть разность между наивысшим и наименьшим уровнями, на больших реках может быть значительной: она достигает 14 м на Волге и 20 м на Енисее.

Изменение водности на протяжении многолетних периодов вызывает многолетние колебания уровней воды.

Уровни воды измеряют на водомерных постах. Наглядное представление об этом дает график колебаний уровней воды, который строят в прямоугольной системе координат: по горизонтальной оси графика откладывают время в днях за весь год, по вертикали — уровни воды.

При изучении режима рек за длительный период устанавливают характерные уровни воды, к которым относятся: наивысший годовой, весеннего и осеннего ледоходов, летних и осенних паводков, наименьший летний и зимний уровни.

На основании многолетних водомерных наблюдений устанавливают даты наступления характерных уровней, наивысшее, среднее и наименьшее значения каждого из них, амплитуду колебания уровня, продолжительность ледостава, осеннего и весеннего ледоходов, даты вскрытия и замерзания рек и другие характеристики.

Все данные уровенного режима используются при проектировании гидротехнических сооружений, при установлении зоны и продолжительности затопления земель, для целей судоходства и т. д.

§ 2. Типы питания рек

Питание рек происходит поверхностными и подземными водами. Поверхностное питание, в свою очередь, подразделяется на снеговое, дождевое и ледниковое.

Снеговое питание рек обусловлено таянием весной снега, накопившегося в течение зимы. Для большинства равнинных рек европейской части СССР сток весеннего половодья (от таяния снега) составляет свыше 50% суммарного годового стока. В реках Северного Казахстана и южных степных районов европейской части СССР сток за счет таяния снега достигает 90—95%. Реки, в которых преобладает снеговое питание, характеризуются сильным повышением расходов в период весеннего половодья.

Дождевое питание рек происходит за счет обложных дождей и ливней. Дождевое питание, в особенности ливневое, отличается значительными колебаниями стока в течение всего года или его части. Обложные дожди могут захватывать большие площади и обеспечивать сток в более или менее продолжительный период времени. Ливни же, распространяющиеся на небольшие площади и имеющие малую продолжительность, вызывают быстро проходящие, иногда довольно значительные паводки. Реки с дождевым или преобладанием дождевого питания находятся в Закавказье (Колхидская низменность), в северной части Черноморского побережья, в Крыму и Восточной Сибири.

Ледниковое питание представляет собой сток от таяния льда и вечных снегов в высокогорных районах. Наибольший ледниковый сток наблюдается в самые жаркие месяцы, поэтому и половодье на реках такого питания проходит летом. Кроме того, во время половодья заметны подъемы уровней воды днем и снижение их ночью. Реки с ледниковым питанием находятся на Кавказе, Алтае и в Средней Азии.

Питание рек подземными водами наиболее устойчиво и равномерно в течение круглого года. Подземное питание в той или иной мере имеют почти все реки. Так, р. Волга на 30% питается за счет подземных вод. На некоторых малых реках подземное питание достигает 60%. В районах распространения вечной мерзлоты подземное питание ограничено. Наибольшее распространение имеет смешанное питание, состоящее из двух-трех видов.

§ 3. Распределение стока по сезонам. Классификация рек СССР

Количество воды, поступающей в реки в различные периоды года, весьма различно, то есть распределение стока за год неравномерно. На распределение стока в первую очередь влияют климатические факторы — осадки и температура воздуха. Несмотря на значительные колебания этих факторов в различные годы, они характеризуют общий тип годового распределения или форму гидрографа стока.

На распределение стока влияют также размер бассейна, его рельеф, геологическое строение, водоносные горизонты, наличие лесов, болот и озер.

Значительные изменения в распределении годового стока происходят в результате хозяйственной деятельности человека.

Климатические факторы определяют общий характер распределения стока в том или другом географическом районе. Остальные же физико-географические факторы могут в значительной мере изменить внутригодовое распределение стока, свойственное данному району. Это особенно важно для малых рек, где влияние так называемых дополнительных факторов может быть преобладающим.

Климатические факторы имеют географическую зональность. Поэтому различные источники питания средних рек в том или ином районе имеют постоянное соотношение, а форма гидрографа является устойчивой для разных рек. На этом принципе основаны различные классификации рек, которые отражают распределение годового стока.

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

Последующие советские исследователи (М. И. Львович, Б. Д. Зайков) положили в основу характеристики внутригодового распределения стока анализ гидрографа.

Все реки Советского Союза Б. Д. Зайков делит на три основные группы: с весенним половодьем, с половодьем в теплую часть года и с паводочным режимом.

Реки с весенним половодьем наиболее распространены в СССР. В зависимости от характера половодья и размера стока в остальную часть года реки этой группы делятся еще на пять типов.

1. Казахстанский тип характеризуется очень высокой волной половодья и низким (до полного пересыхания) стоком в остальную часть года. Сток дают почти исключительно зимние осадки, быстрое таяние которых вызывает высокое, но непродолжительное половодье (рис. 11, 1).

2. Восточноевропейский тип (рис. 11, 2) характеризуется высоким весенним половодьем, летней меженью, прерываемой эпизодически ливнями, низкой зимней меженью и повышенным осенним стоком. Некоторые реки этого типа имеют два максимума: первый (главный) — весной и второй — осенью.

3. Западносибирский тип (рис. 11, 3) имеет небольшое, растянутое половодье, повышенный летне-осенний сток и низкую зимнюю межень. Наличие в бассейнах рек этого типа болот, озер, обширных заливаемых пойм оказывает регулирующее влияние на сток. Длительная зима предопределяет низкий зимний сток.

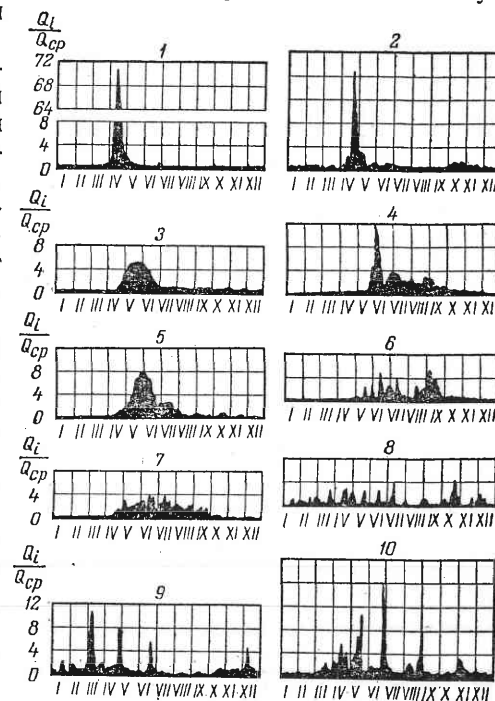


Рис. 11. Типы рек СССР по внутригодовому распределению (1936—1941 гг.):

1— Казахстанский (р. Нура — пос. Самаркандский); 2— Восточноевропейский (р. Волга — г. Калинин); 3— Западносибирский (р. Васюган — с. Васюган); 4— Восточносибирский (р. Колыма — 0,5 км выше устья р. Бохпичи); 5— Алтайский (р. Тобы); 6— Дальневосточный (р. Зея — Зейские ворота); 7— Тяньшанский (р. Вахш — ст. Туткаулская); 8— Причерноморский (р. Сочи — с. Пластика); 9— Крымский (р. Салгир — г. Симферополь); 10— Северокавказский (р. Камбилевка — с. Ольгинское).

4. Восточносибирский тип (рис. 11, 4) характеризуется высоким половодьем, систематическими летне-осенними паводками и очень низким зимним стоком. Этот тип рек связан с обильными дождями летом и осенью и ограниченностью подземного питания.

5. Алтайский тип (рис. 11, 5) отличается невысоким, растянутым, гребенчатовидным половодьем, повышенным летне-осенним и низким зимним стоком. Характер половодья рек этого типа обуславливается особенностями таяния снега в горах: постепенным продвижением области снеготаяния из долин в возвышенные места. На снеговое половодье накладываются дождевые паводки. Устойчивый зимний сток обусловлен запасом подземных вод.

Вторая группа рек — реки с половодьем в теплую часть года — делится на два типа.

1. Дальневосточный тип (рис. 11, 6) имеет растянутое, гребенчатовидное половодье и низкий сток в холодное полугодие (зимних осадков здесь мало); подземное питание ограничено вследствие распространения вечной мерзлоты.

2. Тяньшанский тип (рис. 11, 7), распространенный в горах Средней Азии, Большого Кавказа и Камчатки, отличается от предыдущего более высоким зимним стоком. Питание рек этого типа — ледниковое.

Третья группа рек — реки с паводочным режимом — в зависимости от характера распределения паводков в течение года делятся на три типа.

1. Причерноморский тип (рис. 11, 8) характеризуется паводочным режимом в течение всего года. Основным источником питания здесь являются дожди; частично питание происходит за счет снега, который выпадает в горах и обычно быстро тает.

2. Крымский тип (рис. 11, 9) отличается от предыдущего низким стоком летнего сезона.

3. Северокавказский тип (рис. 11, 10) характеризуется паводками в теплое время и устойчивой меженью в холодное (подземное питание незначительное). Этот тип распространен в восточной части северного склона Большого Кавказа.

Рассмотренные десять типов учитывают лишь основные, наиболее характерные черты режима рек СССР.

§ 4. Ледовый режим рек

Началом ледового режима принято считать момент устойчивого понижения температур воздуха ниже нуля; концом — момент очищения реки от льда.

Весь зимний период делится на три характерные части: замерзание реки, ледостав и вскрытие.

Замерзание реки. При появлении отрицательных температур воздуха начинается процесс охлаждения поверхностных слоев воды, на ее поверхности появляется так называемое сало — тонкая пленка, имеющая вид разлитой масляной жидкости. Одновременно возникают ледовые образования у берегов — забереги, то есть появляется

корка тонкого льда в тихих заводях и на участках со слабым течением или почти стоячей водой.

Выпадение в это время обильного снега приводит к образованию на поверхности воды снегуры — комковатого скопления льда со снегом.

Вследствие турбулентного течения воды в реках происходит быстрое перемешивание водяных масс. Поэтому при охлаждении верхних слоев, непосредственно соприкасающихся с холодным воздухом, происходит постепенное охлаждение воды во всем живом сечении потока. При сильном охлаждении воздуха температура воды может быть близкой к нулю и даже иметь отрицательное значение; происходит переохлаждение воды, выражающееся лишь в сотых долях градуса. Переохлаждение воды создает благоприятные условия для образования внутри потока кристаллов льда, которые затем объединяются в глыбы губчатой структуры. Эти образования носят название внутриводного льда.

По мере развития процесса льдообразования массы рыхлого губчатого льда, образовавшегося внутри потока, всплывают на поверхность. От соприкосновения с холодным воздухом они смерзаются и из неплотных, губчатых переходят в плотные, кристаллические.

Всплывший внутриводный лед, снегура, сало образуют большие скопления льда, плывущего по реке. Это явление носит название осеннего ледохода.

Осенний ледоход иногда сопровождается заторами — скоплением в поперечном сечении реки поверхностного кристаллического льда. Заторы вызывают значительный подъем уровня воды и обычно образуются на суженных участках рек, на резких поворотах реки, у искусственных сооружений.

Во время ледохода вода между плывущими льдинами замерзает, увеличивая их размеры; плавающие льдины заполняют большую часть поверхности реки.

Ледостав. С увеличением числа и размеров льдин скорость движения их уменьшается. В местах сужения или крутого поворота реки, у островов или искусственных сооружений скорость плывущих льдин замедляется. В условиях отрицательных температур воздуха это приводит к быстрому смерзанию ледяных полей и образованию сплошного ледяного покрова, или ледостава. Замерзание реки по ее длине происходит неодновременно. Если река протекает в меридиональном направлении, то северные участки ее замерзают раньше, чем южные. Поверхность ледяного покрова также не везде одинакова: местами она гладкая, местами наблюдаются нагромождения льдов, торосы.

Некоторые участки реки не замерзают в течение всей зимы или части ее. Такие незамерзшие участки называются полыньями. Причинами их образования являются большие скорости течения, например, на порогах, выход в русло относительно теплых подземных вод, сброс в реку промышленных вод. Полыни способствуют образованию внутриводного льда.

В период ледостава в реках наблюдаются зажоры. Зажор — это скопление в живом сечении реки больших масс внутриводного льда.

Зажоры, так же как и заторы, преграждают путь движущейся воде, вызывая подъем уровня воды и затопление территории.

На порожистых, незамерзающих участках рек возникают своеобразные ледовые образования, называемые пятами. Пятры представляют собой скопления внутриводного льда конусообразной формы. Быстро нарастая, они достигают поверхности воды и вершины их под влиянием морозов покрываются ледяной коркой. Располагаясь рядом в виде ледяных островов, пятры создают ледяную преграду, способную поднять уровень воды на вышележащем участке.

При низких температурах воздуха происходит интенсивное нарастание ледяного покрова и уменьшение живого сечения; вода, не помещаясь в суженном живом сечении, под напором выходит по трещинам во льду на поверхность и замерзает, образуя наледи. Большое распространение эти образования имеют на реках северо-востока СССР (Лена, Колыма, Индигирка и др.).

На некоторых северных реках, преимущественно малых, наблюдается промерзание рек до дна.

После установления на реке поверхностного ледяного покрова происходит увеличение его толщины. Основной фактор, влияющий на толщину льда, — температура воздуха. Толщину льда в естественных условиях, то есть при покрытии его снегом, можно рассчитать по следующей эмпирической формуле:

$$h_d = \varphi (\sum t)^n, \quad (81)$$

где $\sum t$ — сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха от начала льдообразования до данного момента;

n — показатель степени; согласно исследованиям Ф. И. Быдина, для северных рек $n=0,5$;

φ — коэффициент, который в формуле Быдина равен 2.

По предложению других авторов коэффициент φ колеблется в пределах от 1,25 до 2,0.

Вскрытие реки. С наступлением положительных температур воздуха начинается таяние снега, льда и поступление талых вод в реки. Прежде всего стает снег на поверхности льда, затем лед оттаивает возле берегов, образуются полосы воды вдоль берегов — закраины. Образование закраин обусловлено поступлением теплых талых вод с бассейна и теплоотдачей берегов.

Увеличение расхода и уровней воды реки приводит в движение ледяные массы, происходит подвижка льда. Лед трогается большими полями, движется медленно, а затем останавливается. Подвижек льда может быть несколько, что зависит от интенсивности развития весны.

Дальнейшее поступление воды и повышение уровня способствует поднятию, разламыванию и передвижению льда по течению — начинается весенний ледоход. Весенний ледоход значительно превосходит осенний, так как в нем участвуют большие массы воды и льда, движущиеся со значительными скоростями.

Большие массы льда, нагромождаясь в суженных участках русла, образуют заторы. Ледяные заторы весной нередко приобретают боль-

шую силу, особенно на реках, текущих с юга на север, когда вскрытие более северных участков происходит позднее, чем южных.

Внутриводный лед. Давно установлено, что перед образованием поверхностного покрова из кристаллического льда в потоке появляется внутриводный лед. Однако причины образования внутриводного льда долгое время были совершенно неизвестны.

Детальные исследования процессов образования внутриводного льда проведены советским ученым В. Я. Альтбергом (1939), который считает, что для образования первичных кристаллов льда необходимо два условия: переохлаждение воды и наличие относительно неподвижного слоя воды, в котором непосредственно происходит кристаллизация.

Первое условие осуществляется благодаря турбулентному перемешиванию потока, причем тем интенсивней, чем больше его скорость. Второе условие имеет место в придонном слое потока даже при больших скоростях течения. Переохлажденные частички воды, опускаясь на дно, касаются холодной его поверхности и превращаются в кристаллы льда. При этом выделяется скрытая теплота льдообразования, которая может препятствовать дальнейшей кристаллизации. Но тепло непрерывно уносится течением; кристаллы входят в соприкосновение с новыми переохлажденными частицами, и кристаллизация продолжается. Постепенно кристаллы увеличивают свою массу, но остаются в местах их образования благодаря силе сцепления льда с неровностями дна. По мере накопления льда на дне наступает момент, когда взвешивающая сила становится больше силы сцепления и лед всплывает. Нередко вместе со всплывающим льдом увлекаются и частицы грунта, камни и даже предметы, находящиеся на дне.

Экспериментальными исследованиями А. Н. Зильбермана установлено, что внутриводный лед может образовываться не только на дне, но и на любом другом твердом предмете в воде. Центрами кристаллизации могут быть также частички наносов, находящиеся во взвешенном состоянии.

Наиболее благоприятные условия для образования внутриводного льда представляют участки с быстрыми течениями и каменистым дном. Чем больше скорости, тем интенсивнее происходит турбулентное перемешивание, что обеспечивает лучшие условия для переохлаждения воды и для отхода тепла, выделяемого при кристаллизации.

Образование внутриводного льда прекращается, как только река покрывается поверхностным льдом. Вследствие малой теплопроводности льда переохлаждение воды становится невозможным, температура воды подо льдом даже несколько повышается.

Внутриводный лед в реках причиняет большой вред: закупоривает всасывающие трубы городских водопроводов, забивает турбины гидростанций, водозаборные сооружения на оросительных и осушительных системах. В этих случаях нарушается или полностью прекращается на некоторый период нормальная работа сооружений.

Борьба с внутриводным льдом должна быть направлена на устранение причин, вызывающих его появление, то есть на уменьшение ско-

рости течения путем устройства запаней по поверхности воды из дерева или хвороста. Уменьшение скорости течения влечет за собой быстрое образование поверхностного льда и прекращение процесса образования внутриводного льда.

В некоторых случаях приходится идти на остановку ГЭС, чтобы уменьшить скорости течения и вызвать быстрое образование поверхностного льда. На гидростанциях применяют обогревание решеток водоприемников электрическим током или очистку их от льда механическим способом. Водозаборные сооружения водопроводов для предотвращения их обмерзания помещают в ковши, отрываемые в берегах.

§ 5. Водный баланс речного бассейна

Метод водного баланса является частным выражением физического закона сохранения материи. Этот метод основан на том, что для любого замкнутого объема пространства сумма всех входящих и выходящих водных масс равна соответственно увеличению или уменьшению количества воды внутри данного объема.

Составим общее уравнение водного баланса для произвольно взятой части земной поверхности. Через контур, ограничивающий рассматриваемую часть земной поверхности, мысленно проведем вертикальную цилиндрическую поверхность до водонепроницаемого слоя. Рассмотрим все возможные пути поступления и расходования влаги в рассматриваемом объеме за какой-то период времени T .

Приходную часть баланса составляют:

- 1) атмосферные осадки, выпавшие на поверхность выделенного объема за рассматриваемый период времени, x ;
- 2) вода, конденсирующаяся на поверхности почвы или в почве, k ;
- 3) вода, поступившая на данную площадь через поверхностные водотоки, $y_{пр}$;

- 4) вода, поступившая путем подземного притока, $y'_{пр}$.

Расходование влаги из рассматриваемого объема идет на:

- 1) испарение с поверхности почвы, воды, снега и транспирацию, E ;
- 2) стекание поверхностными водотоками, $y_{ст}$;
- 3) отток подземным путем (подземный сток), $y'_{ст}$.

Разность между приходной и расходной частью баланса будет соответствовать увеличению или уменьшению запасов воды в рассматриваемом объеме ($\pm u$).

Таким образом, общее уравнение водного баланса влаги для произвольного промежутка времени имеет вид:

$$x + k + y_{пр} + y'_{пр} - E - y_{ст} - y'_{ст} = \pm u. \quad (82)$$

Рассмотрим теперь не произвольный контур, а речной бассейн, ограниченный водораздельной линией. Приход воды в бассейн поверхностными водотоками отсутствует, $y_{пр} = 0$. Отток из бассейна поверхностным путем представляет сток рассматриваемой реки $y_{ст}$. Обозначим

$y_{ст} = y$, тогда уравнение (82) можно написать так:

$$x = y + E \pm u - k - (y'_{пр} - y'_{ст}). \quad (83)$$

Величина $(y'_{пр} - y'_{ст})$ представляет собой разность между подземным притоком и подземным оттоком воды из бассейна, то есть подземный водообмен данного бассейна с соседним.

Если поверхностный контур водосбора совпадает с подземным, то $y'_{пр} - y'_{ст} = 0$. При несовпадении подземного и поверхностного контуров водосбора эта величина имеет незначительные размеры, особенно для больших и средних бассейнов; ввиду сложности учета ее принимают $y'_{пр} - y'_{ст} = 0$. Также трудно определить величину конденсации; ее можно подсчитать совместно с испарением, но чаще принимают равной нулю. Относительная величина этой погрешности невелика по сравнению с общим объемом влаги, учитываемой уравнением водного баланса. В таком случае уравнение водного баланса для речного бассейна принимает простой вид:

$$x = y + E \pm u, \quad (84)$$

или, если написать это уравнение относительно величины стока:

$$y = x - E \pm u. \quad (85)$$

Уравнение (84) справедливо для любого ограниченного промежутка времени: года, сезона, месяца.

Последний член уравнения u , характеризующий изменение запасов влаги в бассейне за рассматриваемый промежуток времени, называют аккумуляционным членом. В засухливые годы общий объем запасов воды в бассейне уменьшается и аккумуляционный член имеет знак минус; в многоводные годы происходит накопление влаги, и он имеет знак плюс.

Аккумуляция может быть подразделена на поверхностную и подземную. Поверхностная аккумуляция включает накопление и стайвание снега и льда, накопление и убыль воды в местных понижениях на водосборе и в русловой системе. В подземной аккумуляции можно выделить изменение запаса почвенных вод (зона аэрации) и грунтовых вод.

Если составить уравнение водного баланса речного бассейна для ряда лет (n), затем просуммировать их и почленно разделить на число лет, то получится:

$$\frac{\sum x}{n} = \frac{\sum y}{n} + \frac{\sum E}{n} \pm \frac{\sum u}{n}, \quad (86)$$

где x, y, E — соответственно годовое количество осадков, стока и испарения.

В связи с тем что в многолетний период включаются многоводные и маловодные годы, величина $\frac{\sum u}{n} \approx 0$, то есть аккумуляционный член уравнения в многолетнем разрезе близок нулю. Таким образом, уравнение водного баланса речного бассейна для многолетнего периода

имеет вид:

$$x_0 = y_0 + E_0, \quad (87)$$

где x_0 , y_0 , E_0 — соответственно норма осадков, стока и испарения.

Метод водного баланса является основным средством исследования формирования речного стока как в многолетнем разрезе, так и для отдельных лет или периодов года. С помощью уравнения водного баланса можно установить динамику поступления и расходования влаги на данной территории, а также количественно оценить соотношения приходной и расходной составляющих. Метод водного баланса позволяет косвенным путем определить по разности между изученными величинами тот из компонентов баланса влаги (сток, осадки, испарение и т. д.), который в данных условиях трудно измерить, но знание которого требуется необходимо для решения водохозяйственных задач или для выяснения общих закономерностей влагооборота в пределах рассматриваемого пространства. Расширяющиеся в последние годы комплексные водно-балансовые исследования на орошаемых территориях дают основание считать, что с помощью метода водного баланса следует решать ряд важнейших практических задач орошаемого земледелия: прогноз уровня грунтовых вод, расчет поливных режимов и оросительных норм, определение возвратных вод и т. д.

Составление уравнения водного баланса орошаемой территории имеет некоторые особенности. Так в приходной части баланса следует дополнительно учитывать поступление воды в виде оросительной нормы M , фильтрации воды из оросительных каналов Φ , притока внутриводосборных вод $y_{\text{почв}}$. К расходной части уравнения добавляется испарение с водной поверхности E_v , отток поливных вод поверхностным путем за пределы территории $y_{\text{ст.о}}$ и сброс избыточных оросительных вод $y_{\text{сб}}$. Уравнение водного баланса ограниченного участка орошаемой территории для конечного промежутка времени имеет вид:

$$x + y_{\text{пр}} + y_{\text{почв}} + y'_{\text{пр}} + M + \Phi - E - E_v - y_{\text{ст}} - y_{\text{ст.о}} - y_{\text{сб}} - y'_{\text{ст}} = \pm u. \quad (88)$$

Аккумуляционный член уравнения (88) может быть как положительным — при накоплении влаги на участке, так и отрицательным — при расходовании запасов воды на рассматриваемом орошаемом участке.

А. Д. Саваренским предложена методика цепных водобалансовых расчетов, применимая в условиях отсутствия многолетних наблюдений над стоком и ориентирующаяся на всесторонний достаточно детальный учет местных условий.

Основные положения этой методики следующие:

1) рассматриваемую территорию делят на стоковые водобалансовые участки с различными условиями стока;

2) для расчетов пользуются уравнением водного баланса*:

$$M_1 + S_1 + V_1 = M_2 + S_2 + V_2, \quad (89)$$

* В обозначениях А. Д. Саваренского.

где M_1 — приток на водобалансовый участок по уклону со стороны водораздела в течение расчетного отрезка времени, мм;

M_2 — сток с водобалансового участка по уклону в сторону замыкающего створа, мм;

S_1 — поступление воды сверху (из атмосферы, из снежного покрова и т. п.), за вычетом расходования на транспирацию и испарение, мм;

S_2 — инфильтрация в подстилающую толщу почвогрунтов, за вычетом выклинивания воды из них, мм;

V_1 и V_2 — зарегулированный запас воды в пределах водобалансового участка в начале и в конце расчетного отрезка времени, мм (здесь имеется в виду естественное зарегулирование воды в неровностях микрорельефа, зависящее от геоморфологических особенностей, характера обработки угодий и т. п.);

3) водобалансовый расчет стока выполняют поочередно для отдельных, следующих один за другим, водобалансовых участков и расчетных отрезков времени.

При подобных цепных расчетах можно на каждом водобалансовом участке подсчитывать неизвестные расходные элементы водного баланса (M_2 , S_2 , V_2) по известным приходным (M_1 , S_1 , V_1). Расчетные зависимости между этими двумя группами величин подбирают на основе данных полевых наблюдений, экспериментов и аналогий, а также на основе расчетов передвижения влаги методами гидрологии.

Для разных сезонных условий, типов местности (уклонов, микрорельефа), типов почвогрунтов, их обработки и покрывающей растительности составляют расчетные таблицы и графики водобалансовых соотношений следующих типов (см. работы А. Д. Саваренского):

$$M_2 = f_1(M_1, S_1, V_1); \quad S_2 = f_2(M_1, S_1, V_1).$$

Цепные водобалансовые расчеты при необходимости можно выполнять подобным образом для одного поверхностного стока с использованием водобалансовых уравнений указанного типа только для поверхности водосбора, а также и для подземного стока с использованием аналогичных уравнений для подстилающих толщ.

§ 6. Классификация озер

Озерами называются котловины, или впадины земной поверхности, заполненные водой, не имеющие непосредственного соединения с морем (океаном) и отличающиеся замедленным водообменом.

Искусственно созданное озеро называется водохранилищем. Водохранилища небольших размеров, а также мелководные естественные озера, покрытые водной растительностью, называют прудами.

В развитии озера можно выделить фазы:

1) юности — только что образовавшееся озеро сохраняет свою котловину почти неизменной, то есть существующие отложения еще не оказывают заметного влияния на его ложе;

2) зрелости — характеризуется образованием береговой отмели, появлением дельт в местах впадения рек, развитием водной растительности;

3) старости — неровности котловины сглажены отложениями наносов, за счет продуктов разрушения берегов и откосов дельт расширяется береговая отмель, уменьшаются глубины и растительность распространяется почти по всей поверхности озера. В дальнейшем оно превращается в мелкий водоем с повсеместным развитием растительности, которая из подводной части переходит в надводную и превращает озеро в болото.

По происхождению озера могут быть: плотинные, котловинные и смешанные.

Плотинные озера образуются вследствие перекрытия долины реки обвалом, наносами, обломочным материалом отступающего ледника.

Котловинные озера в зависимости от условий и причин образования котловины бывают тектонические, вулканические, дефляционные, ледниковые, карстовые и термокарстовые.

У тектонических озер котловины образовались в результате тектонических процессов (резких изменений в земной коре), например при землетрясениях. Тектонические озера бывают очень глубокими (Байкал, Севан, Иссык-Куль и др.).

Вулканические озера появляются под действием вулканических сил, например Курильское озеро, Кроницкое и др.

Дефляционные озера образуются в результате выдувания горных пород и в понижениях между барханами и дюнами. Их котловины обычно неглубоки.

Ледниковые озера являются результатом действия ледников, покрывавших когда-то огромные площади континентов. Примером таких озер может служить Селигер.

Карстовые озера — результат химической деятельности подземных и поверхностных вод. Эти озера встречаются в бассейнах р. Северной Двины, на Волжско-Онежском водоразделе, в Горьковской области и Марийской АССР, в Башкирии.

Термокарстовые озера возникают в результате заполнения водой углублений на поверхности земли, образующихся в районах вечной мерзлоты, вследствие таяния подземных пластов или линз льда. Такие озера распространены на территории Якутской АССР.

Смешанные озера образуются от совместного воздействия различных причин. Например, озерная котловина тектонического происхождения подвергалась действию ледников, повлиявших на ее формирование (Ладожское и Онежское озера). Котловина озера плотинного типа может быть подготовлена процессами выветривания, деятельностью текучих поверхностных и подземных вод.

В отношении стока озера делятся на две категории: сточные и бессточные.

Сточные озера характеризуются тем, что поступающие в них поверхностные и подземные воды расходуются на питание вытекающих из них рек, а также на испарение и фильтрацию. Сточные озера могут

иметь сток в течение круглого года или лишь в период наибольшего притока (временно сточные озера). В частном случае, когда одна из стекающих в озеро рек по водности того же порядка, что и река, вытекающая из него, озеро называется проточным. Река, вытекающая из озера, имеет меньшую амплитуду колебания уровней (и расходов); гидрографы таких рек более сглаженные и распластанные, чем гидрографы свободных рек. Озеро служит естественным регулятором режима вытекающей из него реки.

Бессточные озера расходуют поступающие в них воды в основном на испарение и частично на просачивание в грунт.

По составу воды озера разделяются на пресные и соленые, или минеральные. Сточные озера, как правило, бывают пресными. В бессточном озере происходит испарение чистой воды, а соли остаются в нем. Поэтому вода в бессточном озере непрерывно минерализуется (засоляется) и тем быстрее, чем больше концентрация солей приносимых в него вод.

Количество озер на территории Советского Союза велико; из них самое большое по площади озеро — Каспийское; самое глубокое озеро в мире — Байкал.

§ 7. Водный баланс озер

Вода в озеро поступает путем поверхностного и подземного притока, конденсации водяных паров и выпадения атмосферных осадков на поверхность озера.

Расход воды, поступающей в озеро, происходит вследствие испарения с его поверхности, а также путем поверхностного и подземного стока из него. Соотношение между приходом воды и ее расходом вызывает повышение или понижение уровня в озере. При повышении уровня в озере накапливается объем воды:

$$\Delta W = \omega \Delta H, \quad (90)$$

где ω — площадь зеркала;

ΔH — приращение уровня за рассматриваемый промежуток времени.

При понижении уровня объем воды в озере уменьшается на те же величины. Водный баланс озера, то есть соотношение прихода и расхода воды, можно представить так:

$$y_{\text{пр}} + y'_{\text{пр}} + k + x - (u_{\text{ст}} + u'_{\text{ст}} + E) = \pm \Delta H, \quad (91)$$

где $y_{\text{пр}}$, $y'_{\text{пр}}$ — поверхностный и подземный приток в озеро;

k — конденсация водяных паров на поверхности озера;

x — осадки, выпадающие на поверхность озера;

$u_{\text{ст}}$, $u'_{\text{ст}}$ — поверхностный и подземный сток из озера;

E — испарение с поверхности озера.

Все члены уравнения водного баланса в уравнении (91) выражены в виде слоя воды. Можно написать уравнение водного баланса, выразив все его элементы в объемах; тогда в правой части уравнения будет записано приращение объема ΔW . Если обозначить приходную часть

уравнения водного баланса через A , а расходную через B , уравнение (91) получит вид:

$$A - B = \pm \Delta W. \quad (92)$$

Это соотношение показывает, что приток равен оттоку при $\Delta W = 0$, то есть когда уровни в озере не меняются. Когда $\Delta W > 0$ (уровни повышаются), приток в озеро больше расхода воды: $A > B$. Когда $\Delta W < 0$ (уровни понижаются), приход воды в озеро меньше расхода: $A < B$.

Уравнение водного баланса (91) справедливо для сточных озер. В бессточных озерах сток из озера отсутствует, основное расходование воды из озера идет за счет испарения. Поэтому для бессточного озера уравнение водного баланса при отсутствии фильтрации воды через ложе озера:

$$y_{пр} + y_{пр} + k + x - E = \pm \Delta H. \quad (93)$$

Применительно к многолетнему периоду величина ΔH , как имеющая различные знаки, превращается в нуль, и уравнение водного баланса озера в многолетнем разрезе примет вид для сточного озера:

$$\bar{y}_{пр} + \bar{y}_{пр} + \bar{k} + \bar{x} - (\bar{y}_{ст} + \bar{y}_{ст} + \bar{E}) = 0, \quad (94)$$

а для бессточного озера:

$$\bar{y}_{пр} + \bar{y}_{пр} + \bar{k} + \bar{x} - \bar{E} = 0. \quad (95)$$

В эти уравнения входят средние многолетние величины элементов водного баланса.

§ 8. Ветровые волны, сейши

Движения воды в озерах могут быть поступательными (течения) и колебательными.

Поступательные движения водных масс озера возникают под действием ветра (ветровые течения) или в результате неравномерного охлаждения и нагревания масс воды. В проточных озерах возможны речные течения, образующиеся вследствие того, что в месте впадения реки уровень воды озера повышается, а у истока реки понижается; создается уклон водной поверхности, приводящий в движение водные массы озера. Такие течения бывают очень слабыми.

К колебательным движениям водных масс озера относятся ветровые волны и сейши.

Ветровые волны. Исследованиями установлено, что если две среды разной плотности соприкасаются друг с другом, то только в состоянии покоя разделяющая их поверхность будет плоскостью. Если же хотя бы одна из них движется, то разделяющая их поверхность принимает волнообразный характер. В случае взаимодействия между потоком воздуха, то есть ветром, и поверхностью озера — ниже поверхности раздела возникает колебательное движение частиц воды вверх и вниз по некоторым замкнутым траекториям. Это колебательное движение

обуславливается тем, что каждая частица воды, поднятая выше среднего уровня, стремится под влиянием силы тяжести опуститься вниз и благодаря инерции опускается ниже этого уровня и т. д. К указанному чисто колебательному движению присоединяется сравнительно небольшое поступательное движение воды, гонимой ветром. Так образуется волнообразное движение воды, увеличивающееся по мере усиления ветра.

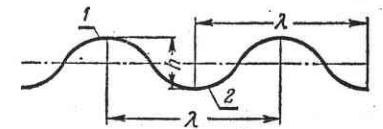


Рис. 12. Схема ветровой волны:
1 — вершина волны; 2 — подошва волны;
 h — высота волны; λ — длина волны.

Ветровая волна характеризуется следующими элементами (рис. 12): высшей точкой, называемой вершиной или гребнем волны, и низшей — подошвой. Расстояние между двумя последовательными гребнями или подошвами двух волн называется длиной волны, а расстояние по вертикали между гребнем и подошвой — высотой волны. Отношение высоты волны к ее длине характеризует крутизну волны. Промежуток времени, в течение которого волна проходит путь, равный ее длине, носит название периода волны. Расстояние, проходимое какой-нибудь точкой волны (например, гребнем) в единицу времени, называется скоростью волны.

Для определения высоты волны, имеющей большое практическое значение, существует ряд эмпирических формул в зависимости от длины разгона волны и скорости ветра, например формула В. Г. Андреянова:

$$h_b = 0,0208 u_b^{5/4} D^{1/3}, \quad (96)$$

где h_b — высота волны, м;
 D — длина разгона волны, км;
 u_b — скорость ветра, м/сек.

А. П. Браславский (1948) разработал метод расчета высоты волны, основываясь на уравнении баланса волновой энергии. Метод Браславского довольно трудоемкий, поэтому для облегчения расчетов пользуются специально составленными номограммами.

Сейши представляют собой колебательные движения всей массы воды в озере. Сейши образуются в результате резкого изменения давления в различных частях озера, а также при наличии резких скачков величины и направления ветра над озером, возникающие, например, при прохождении циклона. Поверхность воды озера при сейшах приобретает уклон то в одну, то в другую сторону. Неподвижная ось, около



Рис. 13. Сейши:
а — одноузловая; б — двухузловая.

которой колеблется зеркало озера, называется узлом. Сейши могут быть одноузловые, двухузловые и т. д. (рис. 13). Наиболее распространены одноузловые сейши. Изучение сейш необходимо для правильного установления среднего уровня воды в озере.

§ 9. Замерзание озер

Основной источник поступления тепла в озеро — прямая солнечная радиация. Кроме этого, на нагревание озерной воды влияют: тепло-та слоев воздуха, лежащих над поверхностью воды; теплоотдача берегов озера и озерной котловины; теплота, освобождающаяся при образовании льда и конденсации водяных паров на поверхности озера; более высокая температура впадающих в озеро рек и подземного при-тока.

Потеря тепла происходит путем излучения его в атмосферу. В значительно меньшей степени на охлаждение озера влияют такие факторы, как потери тепла при испарении воды и таянии льда, при впадении в озеро холодных притоков и т. д.

Соотношение количества тепла, получаемого и отдаваемого озером, называется тепловым балансом. Для анализа термического режима озера необходимо иметь в виду следующие термические свойства воды: чрезвычайно малую теплопроводность воды (передача тепла по глубине под влиянием одной лишь физической теплопроводности происходит очень медленно);

большую теплоемкость воды (поэтому водоемы представляют собой мощные аккумуляторы тепловой энергии, сохраняющие ее значительно дольше, чем почва);

увеличение плотности воды при понижении температуры до 4°C (наибольшая плотность пресной воды при температуре 4°C). Дальнейшее понижение температуры (ниже 4°C) снижает плотность до точки замерзания, а с переходом воды в лед плотность резко падает.

В перераспределении тепла по глубине озера главным образом участвуют конвекция, течения и волнения.

Конвекцией называется вертикальное перемещение частиц в силу различной их плотности. Конвекция является основной причиной неравномерного распределения температур воды в озерах по их глубине. В этом отношении выделяются два основных случая.

1. Если температура всей массы озера от поверхности до дна выше 4°C , то у поверхности располагаются теплые слои воды, а ниже более холодные, имеющие большую плотность, то есть с глубиной температура постепенно понижается. Такое послойное распределение температур по глубине называется прямой стратификацией (рис. 14, а).

2. Если температура всей массы озера находится в пределах от 0 до 4°C , то у поверхности находятся слои с более низкой температурой, а ниже в соответствии с изменением плотности располагаются слои с постепенно увеличивающейся температурой, приближающейся к 4°C . Такое явление называется обратной термической стратификацией (рис. 14, б).

Прямая стратификация наблюдается в теплое время года и усиливается при нагревании воды. При охлаждении поверхности озера верхние слои становятся более тяжелыми и опускаются вниз, происходит перемешивание слоев, стратификация нарушается. При длительном охлаждении вся вода озера принимает однородную температуру наибольшей плотности. Дальнейшее охлаждение уже не вызывает опускания верхних слоев, и стратификация переходит в обратную. Такой переход совершается обычно осенью перед замерзанием озера. Прямая стратификация устойчива при нагревании воды озера, обратная — при охлаждении.

Процесс замерзания озер происходит следующим образом. При похолодании, когда температура на поверхности озера падает ниже 4°C , в озере устанавливается обратная стратификация. Дальнейшее понижение температуры воздуха вызывает охлаждение поверхностного слоя воды до 0°C . Этот слой остается на поверхности, переохлаждается и превращается в лед. Если озеро спокойно, то в первую же ясную холодную ночь поверхностный слой воды превращается в тонкую сплошную ледяную пленку. В дальнейшем эта пленка постепенно утолщается, превращаясь в ровный гладкий покров из прозрачного кристаллического льда.

При сильном ветре образование льда на самой поверхности из-за волнения становится невозможным, но переохлаждение воды распространяется на некоторую глубину и способствует образованию внутриводного льда. В этом случае замерзание озера имеет некоторую аналогию с замерзанием реки.

Замерзание озера начинается только тогда, когда температура поверхностного слоя понизится до 0°C , то есть при охлаждении нижних слоев до 4°C . В связи с этим всегда нужно известное время между переходом температуры воздуха через 0°C и замерзанием озера.

С повышением температуры воздуха лед начинает таять, а затем и вскрывается. Обычно лед тает на месте, а на проточных озерах часть льда уносится вытекающей рекой.

§ 10. Болота, их образование и классификация

Болотами называются избыточно увлажненные участки земной поверхности, занятые влаголюбивой, приспособленной к недостатку кислорода в почве растительностью. На этих участках идет процесс торфонакопления, а толщина торфа такова, что корни основной массы растений не достигают подстилающего минерального грунта. Участки, на которых толщина торфа мала и корни растений располагаются в минеральном грунте, относятся к заболоченным землям.

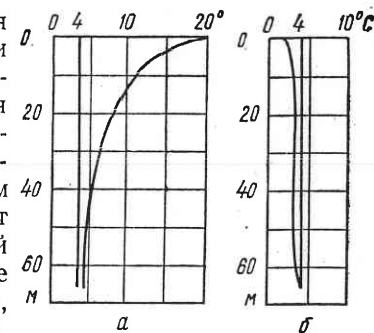


Рис. 14. Термические стратификации озера:
а — прямая; б — обратная.

Болота образуются путем заболачивания суходольных участков или зарастания естественных водоемов.

Образование болот на суходолах происходит в областях с замедленным стоком, с малой речной сетью, с преобладанием притока воды над оттоком. Заболачиванию способствует наличие неглубоко залегающего водонепроницаемого грунта (обычно глины), что вызывает постоянное избыточное содержание влаги в верхних горизонтах.

В этих условиях в хвойном лесу появляются зеленые мхи, а затем сфагнум, прекращающий доступ кислорода к корням деревьев, ведущий к постепенному отмиранию деревьев и переходу леса в болото.

Заболачивание лугов происходит под влиянием плотнокустовых злаков, развивающих свой узел выше поверхности земли. Плотная дернина затрудняет проникновение кислорода в почву, задерживает осадки между кочками; происходит накопление органического вещества (торфа), луговая растительность гибнет. Образуется осоковое болото, затем под влиянием недостатка зольной пищи осоки уступают место мхам.

В районах вечной мерзлоты заболачиванию территории способствует наличие толщи вечномерзлого грунта, задерживающего всю воду у поверхности земли.

Образование болот возможно у подножия склона речной долины, если этот склон непрерывно увлажняется выходящими на поверхность грунтовыми водами.

Болота образуются при зарастании водоемов: озер, речных стариц, заводей. Зарастание озера происходит в результате отложения на дне ила, так называемого сапропеля, и выноса в озеро минеральных и органических веществ, смытых с водосборной площади и обуславливающих постепенное обмеление озера. Озеро с берегов начинает зарастать водной растительностью, которая, отмирая и падая на дно, способствует дальнейшему обмелению озера. С течением времени растительность покрывает все озеро и образуется болото с характерной водолюбивой растительностью. Отмирающая растительность, насыщенная водой, вследствие недостатка в воде кислорода полностью не разлагается и превращается в торф.

В зависимости от стадии развития различают следующие типы болот: низинные, переходные и верховые.

Н и з и н н ы е болота относительно богаты минеральными веществами, что способствует развитию травяной растительности: осок, тростника, зеленых мхов. Мощность торфа в таких болотах небольшая.

В п е р е х о д н ы х болотах по мере увеличения мощности торфа и уменьшения в нем минеральных веществ осоковая растительность заменяется кустарниковой и древесной.

В в е р х о в ы х болотах дальнейший процесс накопления органических веществ и уменьшения минеральных солей приводит к распространению мха сфагнума. Сфагнум быстрее растет в центре болота, поэтому поверхность болота прижимает выпуклую форму, причем разница высот между краями и центром достигает 5 м и более.

§ 11. Гидрологические особенности болот

Болото имеет ряд гидрологических особенностей по сравнению с озерами, реками и сушей. В торфяных болотах содержится от 89 до 94% воды по весу и всего от 11 до 6% сухого вещества, которое и удерживает в болоте такое огромное количество воды. Связанность воды в болоте сухим веществом торфа исключает возможность использования ее для дополнительного питания рек. Осушение болот снижает содержание воды в торфе незначительно, до 85%. Дальнейшее снижение влаги в торфяных болотах происходит только под влиянием испарения. Таким образом, болота являются аккумуляторами влаги.

Гидрологический режим болот обуславливается такими факторами, как источники питания, структура и свойства торфа, движение воды в торфяных грунтах, колебания уровня грунтовых вод, испарение, сток с болот.

Источники питания болот. Условия питания различных типов болот неодинаковы и зависят от высотного положения болота по отношению к рельефу местности. По мере возвышения поверхности болота уменьшается роль грунтового питания и возрастает значение атмосферных осадков. Низинные и переходные болота питаются главным образом грунтовыми водами и поверхностными водотоками в период их разлива, а верховые болота — в основном за счет атмосферных осадков.

Структура торфа и его водные свойства. Органическая часть торфяной массы представляет собой сочетание частиц различных размеров: от видимых невооруженным глазом до коллоидных частиц. С повышением степени разложения торфа увеличивается количество мелких фракций и их удельная поверхность. Поэтому по мере увеличения степени разложения торфа увеличивается степень связанности воды с твердой фазой.

Содержащаяся в торфяном болоте вода делится на: с в о б о д н у ю, отделяющуюся от торфа под действием силы тяжести, и с в я з а н н у ю с торфяной массой, не отделяющую под действием силы тяжести.

Наибольшее количество воды, которое удерживается грунтом в порах при наличии свободного стока, называется полной влагоемкостью. Полная влагоемкость торфа в несколько раз больше, чем минеральных грунтов; в сфагновых торфах она достигает 92—94%, в низинных травяных торфах — 89—91%.

Слои торфа, расположенные выше уровня грунтовых вод, увлажнены до полной влагоемкости без потерь на испарение, которые увеличиваются с приближением к поверхности.

К водным свойствам торфа относится его водопроницаемость, характеризующаяся коэффициентом фильтрации. Величина коэффициента фильтрации торфа зависит от типа болота и степени разложения торфа. Наибольшее значение коэффициента фильтрации имеют самые верхние, наименее уплотненные слои торфа. С глубиной по мере увеличения степени разложения торфа водопроницаемость его падает. Коэффициент фильтрации нижних, сильно разложившихся и уплотненных слоев торфа близок к нулю.

Движение воды в торфяном грунте. Движение воды в торфяной залежи происходит в основном путем фильтрации по верхнему слабоуплотненному слою. Этот слой (от поверхности болота до среднего положения низших уровней грунтовых вод на болоте) называется деятельным, или активным, слоем болота; нижерасположенные горизонты образуют инертный слой.

Деятельный слой болота характеризуется колебанием в его пределах уровня грунтовых вод, высоким коэффициентом фильтрации и переменной влажностью. Инертный слой отличается постоянным содержанием воды и ничтожно малой водопроницаемостью торфа; практически вся влага в инертном слое находится в связанном состоянии. Поэтому из торфяной залежи в реку может поступать только свободная вода, аккумулированная в деятельном слое.

Колебания уровня грунтовых вод. На положение уровня грунтовых вод влияют рельеф болота, характер растительности, климат, осушительные каналы. Под влиянием рельефа уровень грунтовых вод на болоте не образует горизонтальной поверхности, а следует за изгибами на возвышенностях, откуда закономерно снижается по склонам. Сеть осушительных каналов снижает уровень грунтовых вод.

Под влиянием климата на болоте происходят сезонные колебания уровня грунтовых вод. Весеннее половодье поднимает уровень грунтовых вод (весенний максимум). Минимальный уровень наблюдается летом (летний минимум) при повышении температуры воздуха и увеличении испарения. Понижение температуры воздуха осенью при наличии атмосферных осадков вызывает подъем уровня грунтовых вод (осенний максимум).

Медленный сток воды с болот в зимнее время при отсутствии поверхностного питания приводит к постепенному снижению грунтовых вод в течение зимы (зимний минимум).

Испарение с болот. В зависимости от положения уровня грунтовых вод выделяются три стадии в процессе испарения. Первая стадия относится к условиям полного насыщения болотного грунта водой. Уровень грунтовых вод находится на поверхности торфа или ниже, но в пределах зоны капиллярного поднятия в наиболее крупных порах. В этом случае испарение целиком определяется метеорологическими факторами. При дальнейшем снижении уровня грунтовых вод, когда уже не все, а только часть более мелких пор сможет подавать воду к поверхности, наступает вторая стадия испарения.

Наконец при снижении уровня ниже зоны капиллярного поднятия наступает третья стадия испарения. В этой стадии капиллярный поток к поверхности отсутствует и почва начинает просыхать на некоторую глубину.

Колебания месячных величин испарения из года в год также соответствуют изменению уровня грунтовых вод. В те месяцы, когда наблюдаются резкие колебания уровней, величины испарения также сильно изменяются, и, наоборот, при незначительных колебаниях уровня грунтовых вод испарение из года в год мало меняется. Испарение с верховых болот в июле и августе ниже, чем с водной поверхности. Это объясняет-

ся понижением уровня грунтовых вод в эти месяцы, ухудшением водоснабжения сфагнового мха и соответственно уменьшением транспирации.

В зонах лесостепи и степи влаголюбивая растительность низинных болот может испарять больше, чем соседние незаболоченные территории.

Сток с болот. В течение продолжительного времени считалось, что болота, как и озера, являются регуляторами стока. Такое ошибочное представление явилось следствием отсутствия достаточных материалов наблюдений над процессами стока с болот.

Как отмечалось ранее, сток с болот осуществляется в основном путем фильтрации в деятельном слое. Поэтому снижение уровня грунтовых вод ниже границы деятельного слоя сопровождается или полным прекращением стока, или уменьшением его до весьма малых значений. Вследствие этого с верхового болотного массива в периоды низкого стояния уровня грунтовых вод (зимой и летом) сток прекращается.

Сток с низинных болот формируется за счет грунтовых и поверхностных вод, поступающих на поверхность болота при разливах рек и в меньшей мере за счет атмосферных осадков. Такие условия приводят к тому, что на низинных болотах сток в летний период бывает несколько выше, чем на верховых, и, следовательно, низинные болота обеспечивают более устойчивое питание рек в летний период, чем верховые. Таким образом, верховые и низинные болота по-разному влияют на внутригодовое распределение стока.

Исследования, проведенные К. Е. Ивановым, показали, что средний многолетний сток с малых заболоченных водосборов на территории северо-западных районов лесной зоны не отличается от величин стока других водосборов. В центральных районах РСФСР (южная часть Калининской области, Московская область с прилегающей к ней Мещерской низменностью) средний многолетний сток на 15—17% меньше средних районных величин.

Влияние болот на максимальный сток весеннего половодья зависит от типа болота, расположения болотных массивов на водосборе и от степени заболоченности бассейна. Так, исследования Н. Н. Захаровской показали, что при заболоченности до 35% модули максимального стока половодья уменьшаются. Это объясняется главным образом несовпадением пиков половодья с заболоченных и суходольных частей водосбора. Несовпадение пиков половодья происходит от неравномерности таяния снега на разных угодьях: вначале снег тает в поле, затем в лесу и на болотах.

С возрастанием заболоченности водосбора (более 35%) максимальный модуль стока половодья увеличивается; при заболоченности 80—100% максимальный модуль стока бывает выше, чем с незаболоченного бассейна. При сплошной заболоченности снеготаяние, а следовательно, и сток происходит одновременно со всего бассейна. Кроме того, при полном заполнении емкости деятельного слоя талые воды устремляются к реке, в то время как на незаболоченных водосборах часть талых вод расходуется на фильтрацию в грунт.

Появление стока с болот от дождей зависит от слоя осадков и высоты стояния грунтовых вод. Дожди, выпадающие при уровнях грунтовых вод, лежащих ниже деятельного слоя, вызывают подъемы уровней только в пределах инертного слоя и не оказывают влияния на сток, полностью аккумулируясь. Если уровень грунтовых вод находится в пределах деятельного слоя, каждый подъем уровней от выпадающих осадков сопровождается резким повышением расходов в вытекающих из болот реках.

Глава IV. ГОДОВОЙ СТОК И ЕГО РАСПРЕДЕЛЕНИЕ

§ 1. Характеристика годового стока

Количество воды, стекающее с данного бассейна за год, называется годовым стоком.

Годовой сток в каком-либо створе реки не остается постоянным во времени, так как он зависит от климатических факторов и в первую очередь от осадков и испарения. Это ясно видно из уравнения водного баланса речного бассейна (84).

Кроме того, на колебания годового стока оказывают влияние физико-географические факторы: величина и форма бассейна, рельеф его, почвенный и растительный покров, озерность, залесенность бассейна и др.

Длительными наблюдениями установлено, что колебания годового стока носят циклический характер, выражающийся в последовательной смене многоводных и маловодных лет. Циклы могут различаться как по своей длительности, так и по степени отклонения от среднего значения. Некоторые циклы бывают выражены более четко, в других на общем фоне многоводья проявляются отдельные маловодные годы или небольшие группы маловодных лет, или, наоборот, в маловодном цикле встречаются многоводные годы. Наиболее продолжительные наблюдения речного стока на территории СССР (с 1812 по 1958 г.) велись на р. Немане у Смалининка (рис. 15). Как видно из рисунка, длительность циклов изменения водности р. Немана составляет от 11 лет

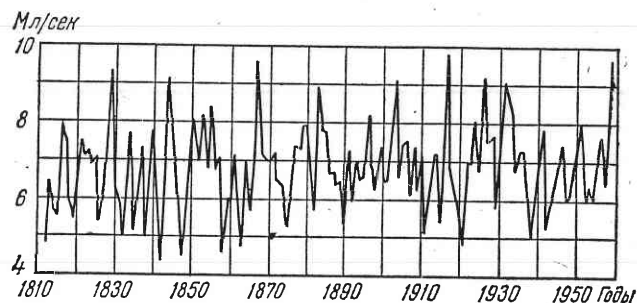


Рис. 15. Колебания годового стока (л/сек) р. Немана у г. Смалининка за период 1812—1958 г.

до 21 года. Менее продолжительные наблюдения на других реках также свидетельствуют о наличии циклов изменения водности.

Отчетливо проявляется цикличность изменения стока в колебаниях уровней бессточных озер.

Циклические колебания водности рек и уровней озер вызываются изменением солнечной активности и связанной с ней общей циркуляцией атмосферы, определяющей распределение осадков и испарения на земном шаре.

Средняя величина годового стока за многолетний период с неизменными физико-географическими условиями называется *нормой стока*. При этом длительность периода должна быть такой, при которой дальнейшее удлинение ряда величин годового стока практически не меняет значения нормы. Значение нормы стока, наиболее близкое к действительному, может быть получено из ряда, включающего наибольшее число полных циклов колебаний водности реки.

Норма стока является очень важной гидрологической характеристикой, обязательно определяемой при проектировании гидротехнических сооружений, водохранилищ, водоснабжения и т. д. Большое значение нормы стока как расчетной характеристики объясняется ее относительной устойчивостью, обусловленной устойчивостью средних многолетних величин осадков и испарения. Поэтому норма стока, определенная по наблюдениям за некоторый прошедший период, распространяется на будущий период эксплуатации проектируемых гидротехнических сооружений.

Если под влиянием каких-либо причин, например в результате хозяйственной деятельности человека, физико-географические условия целого района или рассматриваемого бассейна существенно изменяются, то в величину нормы стока должны быть внесены поправки, учитывающие эти изменения.

Возможное влияние на сток климатических изменений вследствие развития оросительных и осушительных мелиораций, создания крупных водохранилищ, снижения уровней морей и межбассейновых перебросок воды пока еще достаточно не выявлено.

Многолетние исследования влияния агротехнических мероприятий на водность рек, выполнявшиеся рядом научных учреждений, дают возможность приблизительно их учитывать.

По исследованиям А. Д. Саваренского (1963) изменения средних годовых объемов стока под влиянием агротехнических мероприятий в центральных черноземных районах могут достигать в перспективе 22% по сравнению с современным уровнем.

При расчетах нормы стока встречаются следующие три случая: 1) достаточно продолжительный период наблюдений за стоком; 2) короткий период наблюдений и 3) полное отсутствие наблюдений за стоком. Рассмотрим все эти случаи в соответствии с «Указаниями по определению расчетных величин годового стока рек и его внутригодового распределения» (СН 371—67), которые вошли в действие с 1 декабря 1967 г.

§ 2. Определение нормы стока

Определение нормы стока при наличии многолетних гидрометрических наблюдений. В этом случае норму стока определяют как среднее арифметическое значение годовых величин стока:

$$Q_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (97)$$

где Q_i — годовые величины стока;

n — число наблюдений.

По выражению (97) точное значение нормы может быть найдено только в случае, когда n стремится к бесконечности; в остальных случаях норма получается с некоторой ошибкой.

В соответствии с изложенным во второй главе относительная средняя квадратическая ошибка нормы стока, вычисленной по ограниченному ряду за n лет, равна:

$$E_{Q_0; 0,68} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100\%. \quad (98)$$

Относительная средняя квадратическая ошибка нормы стока не должна превышать 5%.

Согласно формуле (98), точность определения нормы стока зависит от изменчивости годовых величин стока (C_v) и длительности периода наблюдений.

Ввиду циклического характера многолетних колебаний стока очень важно правильно выбрать расчетный период. Если вычислить норму стока только по одной многоводной или маловодной фазе цикла водности, то ошибка нормы получится наибольшей. Точнее можно вычислить норму как среднее арифметическое за полный цикл, состоящий из многоводной и маловодной его фаз, на протяжении которых взаимно компенсируются отклонения стока от средней величины. Если период состоит из двух полных циклов, ошибка нормы уменьшится, если из трех циклов, она будет еще меньше и т. д.; так как, согласно формуле (98), ошибка среднего арифметического уменьшается с увеличением длины ряда.

Таким образом, для определения нормы стока следует принимать период, включающий наибольшее число законченных циклов колебания годового стока, состоящих из групп многоводных и маловодных лет. Неполные циклы (имеющие только многоводную или маловодную фазу) из ряда исключаются. При очень длинном периоде наблюдений, более 60 лет, норму стока вычисляют с учетом всего ряда, так как в этом случае от прибавления некоторого числа лет, не составляющих полного цикла, средняя арифметическая величина изменяется незначительно.

Циклические колебания стока и расчетный период для определения нормы стока устанавливают с помощью разностных суммарных кривых годового стока. Наиболее удобно строить разностные кривые в относительных величинах — в модульных коэффициентах $K = \frac{Q_i}{Q_0}$. Для по-

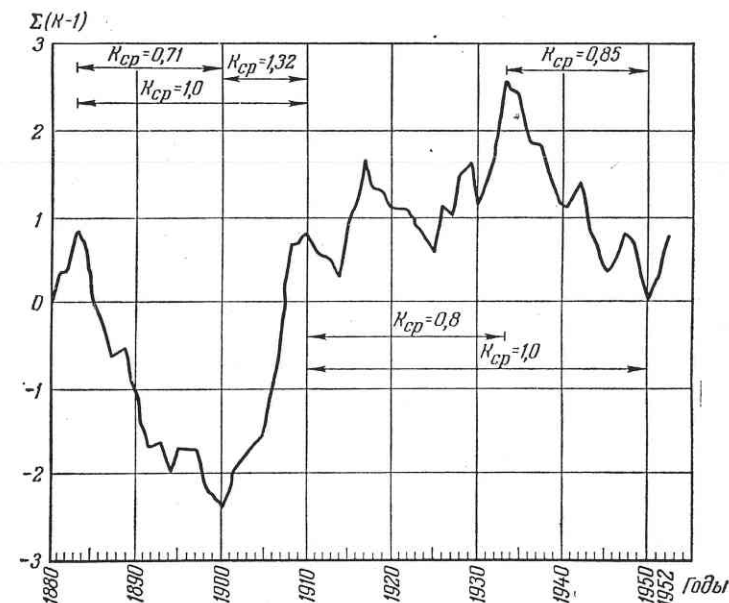


Рис. 16. Разностная суммарная кривая годового стока р. Оки у г. Орла за период 1881—1952 гг.

строения такой кривой последовательно суммируют отклонения модульных коэффициентов от среднего K , равного единице, то есть устанавливают зависимость $\Sigma(K-1) = f(T)$. Пример такой кривой приведен на рисунке 16. Разностная суммарная кривая имеет следующее свойство: отклонение среднего значения величины (в данном случае модульного коэффициента) за какой-либо интервал времени от среднего его значения за весь период наблюдений характеризуется тангенсом угла наклона к горизонту прямой, соединяющей точки начала и конца интервала.

$$K_{cp} - 1 = \frac{l_k - l_n}{n}, \quad (99)$$

l_k и l_n — конечная и начальная ординаты суммарной кривой для рассматриваемого отрезка времени;
 n — число лет в нем.

Период времени, для которого участок интегральной кривой имеет наклон вверх относительно горизонтальной линии и положительное значение величины $(K_{cp} - 1)$, соответствует многоводной фазе цикла колебаний стока, а период, для которого участок кривой наклонен вниз и имеет отрицательное значение $(K_{cp} - 1)$, соответствует маловодной фазе. Пользуясь этим, легко выделить по разностной кривой начало и конец каждого цикла и установить продолжительность расчетного периода, по которому следует определять норму стока.

Определение нормы стока при недостаточных гидрометрических данных. При недостаточном количестве гидрометрических данных годового стока норму можно определить: 1) методом корреляции; 2) по графику связи годовых величин стока в изучаемом бассейне и бассейне-аналоге с многолетними данными по стоку; 3) методом аналитического приведения стока к многолетнему периоду.

Сущность всех этих способов состоит в приведении коротких рядов наблюдений к длительным путем установления связи между годовым стоком в изучаемом бассейне (с коротким рядом наблюдений) и бассейне-аналоге с многолетними наблюдениями. Основным условием приведения стока к многолетнему периоду является наличие синхронности колебаний стока в изучаемом и аналогичном бассейнах и примерное соответствие остальных физико-географических факторов.

1. Методом корреляции рекомендуется определять норму стока при проектировании гидротехнических сооружений I и II классов капитальности (СН 371—67). Для применения метода корреляции необходимо иметь параллельные наблюдения в изучаемом и аналогичном бассейнах не менее чем за $n=10-15$ лет при коэффициенте корреляции $r > 0,80$.

Норму стока находят по уравнению регрессии:

$$Q_0 = Q_n + r_n \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q,a}} (Q_{0,a} - Q_{n,a}), \quad (100)$$

где Q_0 — норма стока;

Q_n — величина среднего стока за короткий период n , лет;

σ_Q — среднее квадратическое отклонение средних годовых расходов;

r_n — коэффициент корреляции;

a — индекс, означающий, что данная характеристика относится к реке-аналогу.

Подробное изложение метода корреляции приведено в первой главе.

2. Норму стока по графику связи годовых величин стока в изучаемом бассейне и бассейне-аналоге можно определить при коротком ряде наблюдений путем графического приведения стока к многолетнему периоду. На координатную сетку наносят (в масштабе) величины годового стока за период параллельных наблюдений в обоих бассейнах. По этим точкам проводят линию связи таким образом, чтобы она удовлетворяла равномерному расположению точек по обе стороны. Масштаб построения графика связи выбирают так, чтобы линия связи проходила примерно под углом 45° .

Для построения удовлетворительной прямолинейной связи годовых величин стока необходимо не менее шести соответственных точек при достаточно тесной их связи, отвечающей коэффициенту корреляции порядка $0,7-0,8$. Особенно важно иметь на графике связи точки, близкие к средним значениям стока. Хорошие результаты приведения получаются и в том случае, когда линия связи проведена по точкам, равномерно распределенным по всей амплитуде изменения годовых величин

стока за совместный период наблюдений. Отклонение большей части точек от линии связи не должно превышать 15%.

При недостаточном числе точек средних годовых величин стока для построения графика связи можно дополнительно использовать средние сезонные и средние месячные величины стока.

Связи годовых величин стока бывают прямолинейными и криволинейными. Наиболее часто применяются прямолинейные связи, отвечающие уравнениям вида:

$$Q = A Q_a, \quad (101)$$

или

$$Q = A Q_a + B. \quad (102)$$

Линия связи происходит через начало координат (уравнение 101), если коэффициенты вариации стока имеют примерно одинаковые значения в обоих бассейнах. Прямолинейная связь позволяет определить по графику связи непосредственно норму стока изучаемого бассейна по норме стока, найденной для бассейна-аналога с многолетними данными.

3. Норму стока методом аналитического приведения стока к многолетнему периоду определяют при очень коротком периоде наблюдений (до 5 лет), если невозможно установить графическую связь стока в двух бассейнах. Этот способ основан на использовании формулы (101), то есть исходит из предположения, что линия связи стока в двух бассейнах проходит через начало координат, и соотношение стока за различные периоды времени остается постоянным, а именно:

$$\frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср},a}} = \frac{Q_0}{Q_{0,a}}, \quad (103)$$

где $Q_{\text{ср}}$ и $Q_{\text{ср},a}$ — среднее значение годового стока в изучаемом и аналогичном бассейне за одновременный короткий период наблюдений;

Q_0 и $Q_{0,a}$ — норма стока в изучаемом и аналогичном бассейнах.

Отсюда норма стока в изучаемом бассейне (с коротким периодом наблюдений) равна:

$$Q_0 = Q_{0,a} \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср},a}}. \quad (104)$$

Учитывая, что отношение $\frac{Q_{\text{ср},a}}{Q_{0,a}}$ представляет собой модульный коэффициент стока K за короткий период в бассейне-аналоге, формулу (104) можно записать так:

$$Q_0 = \frac{Q_{\text{ср}}}{K_{\text{ср},a}}. \quad (105)$$

В соответствии с Указанием СН 371—67 формулу (103) можно применять только в случае, когда $K_{\text{ср},a}$ находится в пределах $0,7-1,3$, а

соотношение коэффициентов вариации стока в изучаемом и аналогичном бассейнах $\frac{C_v}{C_{v,a}}$ лежит в пределах 0,8—1,2. При таких соотношениях K и C_v ошибка нормы стока, вычисленной по формуле (103), не превышает 10%.

Определение нормы стока при отсутствии гидрометрических данных. При отсутствии непосредственных гидрометрических наблюдений норму стока определяют:

- по карте изолиний среднего многолетнего стока;
- интерполяцией величин стока между опорными пунктами.

Эти методы расчета исходят из уравнения водного баланса речного бассейна и основаны на географической интерполяции стока.

1. **Определение нормы стока по карте изолиний.** Построение карт среднего многолетнего стока основано на допущении плавного изменения стока по территории соответственно распределению климатических и других физико-географических факторов.

Первая карта среднего многолетнего стока для европейской части СССР была составлена Д. И. Кочериным в 1927 г. Кочерин располагал данными наблюдений только в 32 пунктах, поэтому карта была схематичной, но и она сыграла большую роль в развитии гидрологии. В период с 1927 по 1937 г. эта карта была единственным источником гидрологического обоснования большого количества гидротехнических проектов.

В 1937 г. была опубликована карта среднего многолетнего стока, составленная Б. Д. Зайковым и С. Ю. Белинковым на основании наблюдений по 1280 пунктам. В 1946 г. Б. Д. Зайков уточнил эту карту по данным наблюдений в 2360 пунктах.

С 1961 г. наиболее обоснованными являются «Карты среднего годового стока рек СССР», составленные в Государственном гидрологическом институте К. П. Воскресенским с изолиниями и средних многолетних модулей стока в л/сек с 1 км². На рисунке 17 приведена карта среднегодового стока с изолиниями стока в мм.

Карты речного стока в отличие от климатических карт (осадков, температур воздуха, солнечной радиации и т. д.) составляют по величинам, отнесенным не к точке, а к центру бассейна, так как предполагается, что сток реки, наблюдающийся в каком-нибудь пункте, равномерно распределен по всему бассейну. Из такого принципа построения карты непосредственно следует и методика ее использования для определения нормы стока, а именно для нахождения по карте среднего многолетнего модуля стока — нормы какого-нибудь бассейна, нужно оконтурить на карте рассматриваемый бассейн до замыкающего створа и найти его центр тяжести. Для центра тяжести бассейна определяют норму стока путем линейной интерполяции между ближайшими изолиниями.

Если изолинии стока расположены неравномерно по площади, что бывает обычно при расчлененности рельефа, то простая линейная интерполяция недопустима. В таких случаях норму стока определяют

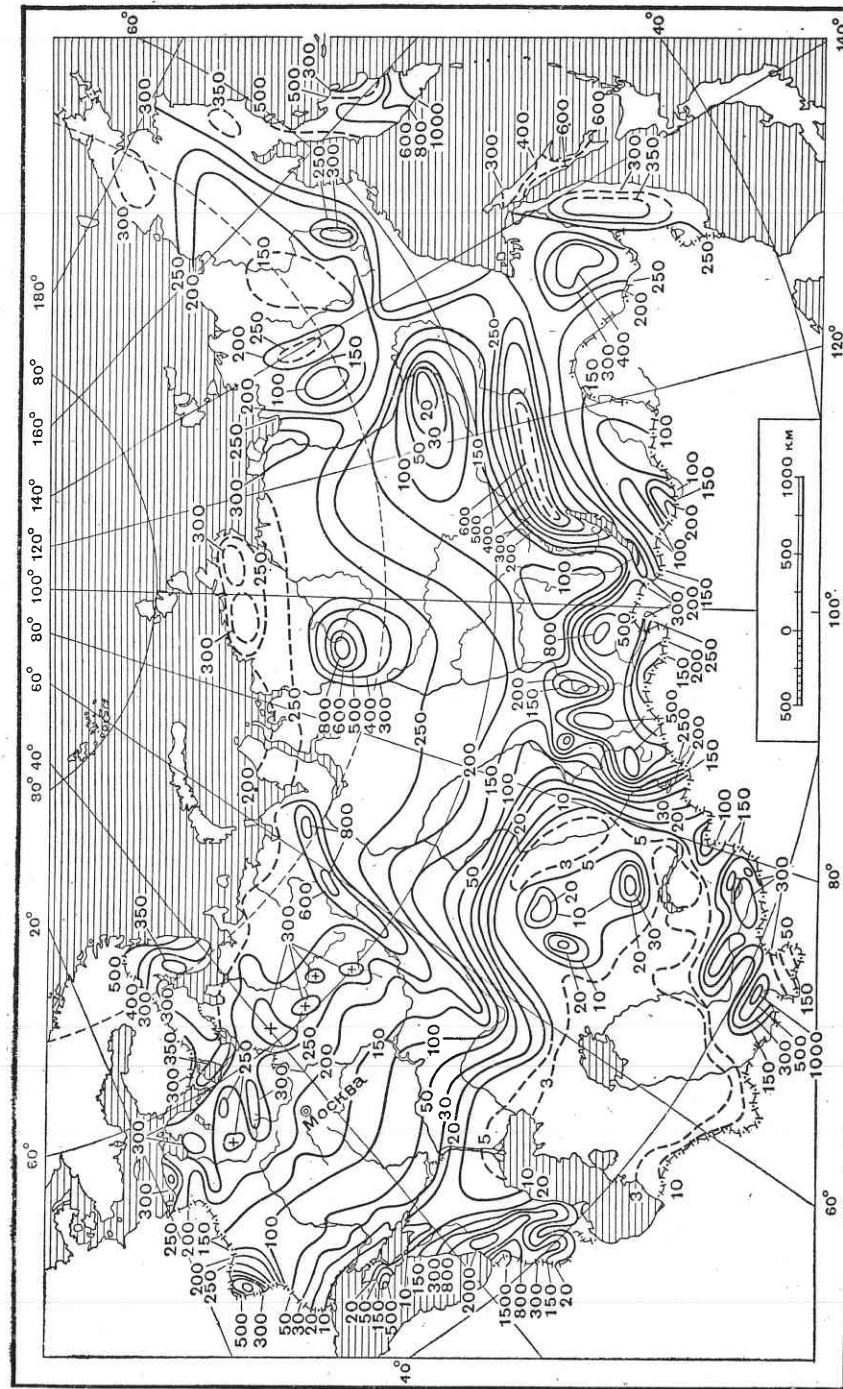


Рис. 17. Карта среднегодового стока СССР (мм).

по карте изолиний как средневзвешенную величину:

$$M_0 = \frac{M_1 f_1 + M_2 f_2 + M_3 f_3 + \dots + M_n f_n}{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n} = \frac{\sum_1^n M_i f_i}{\sum_1^n f_i}, \quad (106)$$

где $f_1, f_2 \dots f_n$ — площади между изолиниями, определяемые планиметром;

$M_1, M_2 \dots M_n$ — соответствующие им средние значения модуля стока.

Зональное изменение физико-географических факторов, положенное в основу составления карт стока, отчетливо проявляется лишь на достаточно больших речных водосборах, в пределах которых влияние местных (азональных) факторов сглаживается. С уменьшением речного водосбора все больше сказывается влияние местных факторов на сток. Поэтому для составления карты использованы данные только по рекам средней величины, сток которых определяется в основном зональными факторами, а водосборы полностью расположены в одной географической зоне.

Исходя из этих соображений по карте ГГИ рекомендуется (Указания СНЗ71-67) определять норму стока рек с площадями водосборов до 50 000 км², а при отсутствии резких изменений в рельефе и климатических условиях и с большими площадями.

При определении по карте нормы стока малых водосборов необходимо вводить поправки для учета местных факторов. Эти поправки могут иметь как положительное, так и отрицательное значение. Приближенные величины поправок для разных зон в зависимости от величины площади водосбора приведены в нормах. Границы зон положительных и отрицательных поправок показаны на картах стока.

Для горных районов карты стока имеют только иллюстративное значение. Норму стока горных рек можно установить по районным зависимостям изменения стока с высотой.

Точность расчета нормы стока по карте ГГИ оценивается в зависимости от коэффициента изменчивости годового стока по таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

Район	Коэффициент изменчивости годового стока, C_v	Средняя ошибка нормы, %
Северный	0,15—0,2	8
Средние широты	0,4—0,5	10
Южные широты	0,6—0,7	15
Крайний юг	1,0—1,5	25

2. Определение нормы стока интерполяцией между опорными пунктами. Этот метод применяют при наличии многолетних наблюдений за годовым стоком в нескольких бассейнах, расположенных вблизи изучаемого (расчетного) створа.

Для этого на топографическую карту наносят средние многолетние величины стока в центрах опорных водосборов; положение центров водосборов устанавливают приблизительно (на глаз). Норму стока для равнинной территории определяют прямолинейной интерполяцией. При значительно меняющемся рельефе между опорными пунктами изменение стока по территории рекомендуется принимать пропорциональным изменению высот местности.

Ошибка нормы, определенной интерполяцией, зависит от точности расчета нормы стока в опорных пунктах.

§ 3. Изменчивость годового стока

Под влиянием климатических и других физико-географических факторов годовой сток претерпевает непрерывные колебания около среднего многолетнего значения — нормы.

Многолетние колебания годового стока и других характеристик стока (максимальные расходы весеннего половодья, минимальные расходы и т. д.) можно рассматривать как изменения случайных величин. Случайными считают какие-либо значения одной и той же величины, последовательность появления которых не связана с появлением предыдущих значений этой же величины.

Исследования, проведенные Л. Д. Соколовским, показали, что связь между годовым стоком двух смежных лет для ряда рек выражается коэффициентом корреляции $r = 0,22 \pm 0,19$, то есть средняя квадратическая ошибка r почти равна его значению.

Таким образом, считают, что связь между годовым стоком смежных лет незначительная, и в практических расчетах этой связью пренебрегают.

Рассматривая средние годовые расходы как совокупность случайных значений варьирующей величины, к исследованиям многолетних колебаний стока можно применить методы математической статистики.

Установив вероятные колебания стока по наблюдениям за сравнительно короткий отрезок времени, экстраполируют пределы колебаний стока на более продолжительные периоды времени, выходящие за пределы периода наблюдений. С этой целью строят кривые распределения и обеспеченности стока.

Кривые распределения стока. Предположим, есть данные по годовому стоку за период N лет, которые выражены в модульных коэффициентах $K = \frac{Q_i}{Q_0}$. Рассмотрим значения годовых величин стока не в календарной последовательности, а в виде статистического ряда, расположенного в убывающем порядке. Если такой ряд разбить на одинаковые интервалы по величине стока и определить частоту повторений его значений в каждом интервале ($n_1, n_2, \dots, n_l$), можно построить ступенчатый график распределения частоты или вероятностей (рис. 18). Такой график в математической статистике называется гистограммой распределения. Из графика видно, что чем ближе значение члена ряда к среднему, тем повторяемость больше. И, наоборот, по мере удаления

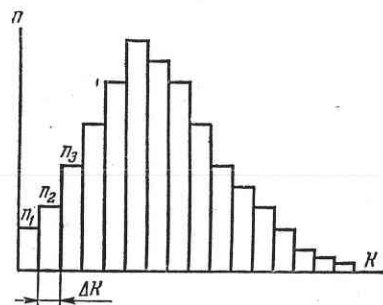


Рис. 18. Гистограмма распределения стока.

от среднего значения вправо и влево все меньше членов ряда попадает в интервал, то есть повторяемость, или частота, падает. Это обстоятельство соответствует закону больших чисел, относительно случайных явлений, из которого следует, что чем больше отклонение какого-либо значения в данном ряду от среднего, тем меньше вероятность появления такой величины.

При безграничном росте числа членов ряда и уменьшении интервала до бесконечно малой величины гистограмма распределения превращается в плавную кривую распределения или кривую вероятностей (рис. 19).

Кривая распределения имеет три характерные точки на оси абсцисс: центр распределения — точка 1 (рис. 19), соответствующая среднему арифметическому значению ряда (ордината, проходящая через эту точку, называется центральной); медиана — точка 2 — делит ряд на две равные части; мода — точка 3 — представляет собой значение члена ряда, которому соответствует наибольшая частота. Ордината, проходящая через эту точку, называется модальной.

Кривые распределения бывают симметричные и асимметричные. Кривая распределения называется симметричной, если центральная ордината, медианная и модальная совпадают и образуют ось симметрии. В асимметричных кривых эти ординаты не совпадают, и расстояние между центральной ординатой и модальной, называемое радиусом асимметрии d (рис. 19), показывает степень асимметричности кривой.

Гидрологические явления обычно характеризуются асимметричным распределением, причем распределение годового, максимального, минимального стоков и других характеристик стока имеют положительную асимметрию (мода и медиана лежат левее центральной ординаты).

Основными параметрами асимметричной кривой распределения являются: 1) среднее арифметическое значение ряда $\bar{x}$; 2) коэффициент изменчивости или вариации ряда C_v и 3) коэффициент асимметрии C_s . В симметричных (нормальных) кривых распределения коэффициент асимметрии $C_s=0$.

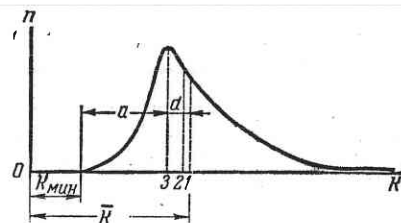


Рис. 19. Кривая распределения вероятностей:

1 — центр распределения; 2 — медиана; 3 — мода.

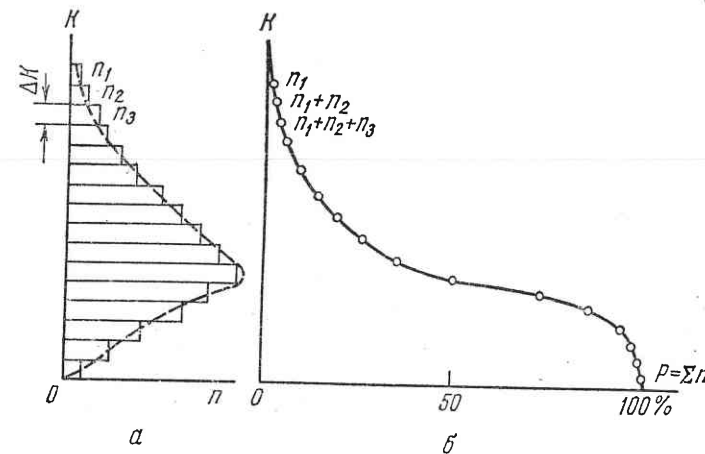


Рис. 20. Схема построения кривой обеспеченности (а) из кривой распределения (б).

Теоретические кривые обеспеченности стока. Представим гистограмму распределения в другом виде, откладывая по оси абсцисс повторяемость n , а по оси ординат значения модульных коэффициентов K (рис. 20). Начиная от наибольшего члена ряда, последовательно просуммируем случаи появления изучаемой величины в пределах выделенных интервалов ΔK и эти суммарные значения выразим в процентах от общего числа случаев N . Получим обеспеченности p соответствующих членов ряда K . Если эти точки нанести на график, откладывая по оси абсцисс обеспеченность p , а по оси ординат значения K , то плавная кривая, проведенная через эти точки, представит собой кривую обеспеченности годовых величин стока.

Таким образом, кривая обеспеченности получена из гистограммы распределения путем последовательного суммирования частот появления изучаемой величины в пределах выделенных интервалов. При превращении гистограммы распределения в кривую для получения обеспеченностей необходимо суммировать бесконечно малые величины, то есть интегрировать кривую распределения. Интеграл кривой распределения принято называть теоретической кривой обеспеченности. Следовательно, для построения кривой обеспеченности годового стока нужно предварительно построить кривую распределения этих величин, а затем ее проинтегрировать.

При выводе понятия кривой распределения мы исходили из предположения наличия очень длинного ряда наблюдений по стоку. Практически построение кривой распределения гидрологических величин (годовых расходов, максимальных, минимальных и т. д.) непосредственно по данным наблюдений не представляется возможным ввиду недостаточности данных. Особенно слабо освещаются данными наблюдений верхний и нижний участки кривой распределения, характеризую-

щие наибольшие и наименьшие значения стока; эти участки являются наиболее важными в расчетах стока. Теоретически строгих обоснований для вывода уравнения кривой распределения гидрологических элементов также нет.

Поэтому теоретическую кривую обеспеченности гидрологических величин, в том числе и годового стока, строят на основании математических кривых распределения, наиболее полно отражающих характер изменчивости гидрологических величин. Наибольшего распространения в гидрологии получили биномиальная кривая распределения (известная также как кривая Пирсона III типа) и кривые трехпараметрического гамма-распределения, разработанные С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем.

Биномиальная асимметричная кривая в практику гидрологических расчетов в СССР была введена Д. Л. Соколовским в 1930 г.

Уравнение асимметричной биномиальной кривой распределения в дифференциальной форме при начале координат в точке моды (см. рис. 19) имеет вид:

$$y = y_0 e^{-\frac{x}{d}} \left(1 + \frac{x}{d}\right)^{\frac{a}{d}}, \quad (107)$$

где x — переменные значения рассматриваемой гидрологической величины (абсциссы кривой распределения);

y — соответствующее значение частоты (ординаты кривой распределения);

y_0 — модальная ордината кривой;

e — основание натуральных логарифмов;

d — радиус асимметрии;

a — расстояние от моды до левого конца кривой.

Кроме того, биномиальная кривая распределения вполне определяется следующими тремя величинами: $\bar{x}$, C_v и C_s . Эти величины называют параметрами теоретической кривой обеспеченности.

Параметры $\bar{x}$, C_v и C_s можно определить для любого гидрологического ряда и на основании их построить биномиальную кривую распределения.

Как видно из выражения (107), точное интегрирование биномиальной кривой невозможно. Поэтому С. И. Рыбкин произвел приближенное интегрирование этой кривой и составил таблицы отклонений ординат кривой обеспеченности от среднего значения при коэффициенте вариации $C_v = 1$ в зависимости от коэффициента асимметрии C_s и обеспеченности p (см. приложение 1). С помощью таблицы С. И. Рыбкина ординаты теоретической кривой обеспеченности вычисляют по зависимости:

$$K_p = \Phi C_v + 1, \quad (108)$$

где K_p — ордината кривой обеспеченности при заданной обеспеченности p ;

Φ — табличное отклонение ординаты кривой обеспеченности от среднего значения: при $C_v = 1$ и заданном C_s ;

C_v — коэффициент вариации.

Задаваясь различными обеспеченностями p (1%, 5, 10, 20, 50 и т. д.), по выражению (108) находят ординаты кривой K_p и по найденным точкам строят теоретическую кривую обеспеченности.

По кривой обеспеченности можно установить, в какой мере обеспечен необходимый для использования объем стока, каковы его предельные (наибольшие и наименьшие) значения, или решить обратную задачу: по обеспеченности установить величину стока.

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

Число лет N , в течение которых рассматриваемое явление (величина) повторяется в среднем один раз, называется повторяемостью гидрологического явления (величины).

Обеспеченность p и повторяемость N связаны между собой следующим образом:

при $p \leq 50\%$ (для многоводных лет)

$$N = \frac{100}{p}, \quad (109)$$

при $p > 50\%$ (для маловодных лет)

$$N = \frac{100}{100 - p}. \quad (110)$$

Зная модульный коэффициент заданной обеспеченности K_p и значение среднего арифметического $\bar{x}$ для данного ряда, можно определить абсолютное значение стока требуемой обеспеченности:

$$x_p = K_p \bar{x}, \quad (111)$$

или

$$Q_p = K_p Q_0. \quad (112)$$

Следовательно, практически задача установления колебаний годового стока состоит в определении параметров теоретической кривой обеспеченности ($\bar{x}$, C_v и C_s) и в построении с помощью таблиц этой кривой.

Рассмотренная биномиальная асимметричная кривая распределения нашла широкое практическое применение и в течение длительного времени являлась почти единственным способом расчета колебаний стока (годового, максимального, минимального и др.).

В то же время асимметричная биномиальная кривая имеет ряд существенных недостатков, к которым относятся ограниченный нижний предел C_v и неограниченный верхний предел кривой. Чтобы выяснить это положение, вернемся к биномиальной кривой распределения (см. рис. 19), откуда видно, что расстояние

$$a + d = 1 - K_{\min}. \quad (113)$$

При интегрировании биномиальной кривой получено:

$$a + d = \frac{2C_v}{C_s}. \quad (114)$$

Сопоставляя эти уравнения, получаем:

$$\frac{2C_v}{C_s} = 1 - K_{\min},$$

откуда

$$C_s = \frac{2C_v}{1 - K_{\min}}. \quad (115)$$

Полученное выражение впервые введено в практику расчетов С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем. Поскольку предельное положение левого конца кривой равно нулю ($K_{\min}=0$), из выражения (115) следует, что нижним пределом C_s является удвоенное значение C_v , то есть $C_s=2C_v$.

Таким образом, для биномиальной асимметричной кривой распределения величина коэффициента асимметрии заключается между следующими пределами:

$$2C_v \leq C_s \leq \frac{2C_v}{1 - K_{\min}}. \quad (116)$$

Анализируя выражение (115), установим положение начала биномиальной кривой распределения при различных соотношениях C_s и C_v . При $C_s=2C_v$ величина $K_{\min}=0$, и, как уже отмечалось, кривая выходит из начала координат (рис. 21).

Если $C_s > 2C_v$, то $K_{\min} > 0$, начало биномиальной кривой отстоит вправо от нуля на величину $K_{\min}$. Наконец, если $C_s < 2C_v$, что соответствует распределению годового стока в засушливых районах, то по выражению (115) минимальное значение $K_{\min}$ должно иметь отрицательное значение, что противоречит физической сущности явления. Таким образом, для случая, когда $C_s < 2C_v$, биномиальная кривая неприменима для расчетов стока.

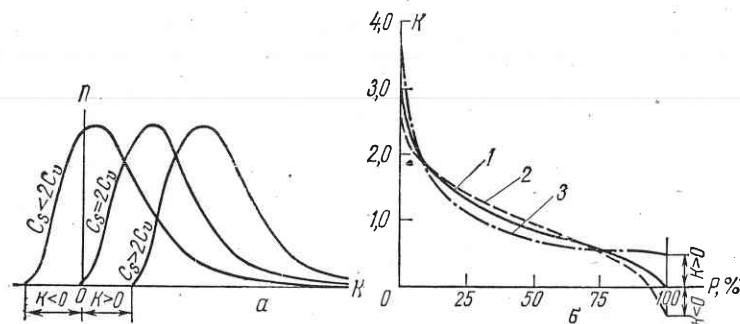


Рис. 21. Кривые распределения (а) и обеспеченности (б) при различных соотношениях C_v и C_s :

1 — $C_s=2C_v$; 2 — $C_s<2C_v$; 3 — $C_s>2C_v$.

В связи с этим немало исследователей пытались применить к анализу гидрологических явлений другие схемы распределения. Однако наиболее общей оказалась схема распределения, предложенная С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем.

С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель (1946 г.) получили семейство кривых распределения, в основе которого лежит допущение, что некоторая функция x^b исследуемой величины подчиняется закону гамма-распределения.

Уравнение этих кривых имеет вид:

$$y = \left(\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \right)^{\frac{\gamma}{b}} \frac{1}{\bar{x} | b | \Gamma(\gamma)} \left(\frac{x}{\bar{x}} \right)^{\frac{\gamma}{b}-1} \exp \left\{ - \left[\frac{\Gamma(\gamma+b)}{\Gamma(\gamma)} \frac{x}{\bar{x}} \right]^{\frac{1}{b}} \right\}, \quad (117)$$

где $\Gamma(\gamma)$ — символ гамма-функции;

γ и b — параметры, связанные трансцендентными уравнениями с параметрами C_v и C_s ;

x — исследуемая случайная величина;

$\bar{x}$ — центр распределения (среднее значение x).

Распределение, выражающееся уравнением (117), также определяется тремя параметрами $\bar{x}$, C_v , C_s и носит название трехпараметрического гамма-распределения.

Трехпараметрическое гамма-распределение допускает любые соотношения C_s и C_v ($\frac{C_s}{C_v} = 1; 1,5; 2,0; 2,5; \dots; 6$), чем отличается от биномиальной асимметричной кривой. При $C_s=2C_v$ уравнение (117) совпадает с уравнением биномиальной асимметричной кривой. Кроме того, все кривые данного семейства выходят из начала координат.

В результате интегрирования кривых распределения С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля получены таблицы, позволяющие определять ординаты теоретической кривой обеспеченности K_p в зависимости от C_v , $\frac{C_s}{C_v}$ и обеспеченности p .

Таблица интеграла трехпараметрического гамма-распределения для соотношения $\frac{C_s}{C_v}=2$ дана в приложении 2. Таблицы для других соотношений C_s и C_v приведены в нормах по расчету максимальных и минимальных расходов воды (1967 г.).

В качестве примера, на рисунке 22 приведены кривые распределения для $C_v=0,60$ и $C_s=C_v$; $C_s=2C_v$, $C_s=3C_v$ и соответствующие им кривые обеспеченности.

Кривые трехпараметрического гамма-распределения имеют более широкий диапазон применения для различных характеристик стока, чем другие кривые распределения. В связи с этим они быстро вошли в практику и в настоящее время имеют широкое применение в расчетах стока.

Проверка теоретической кривой обеспеченности. Клетчатка вероятностей. Для проверки теоретической кривой обеспеченности необходимо сопоставить ее с данными непосредственных наблюдений.

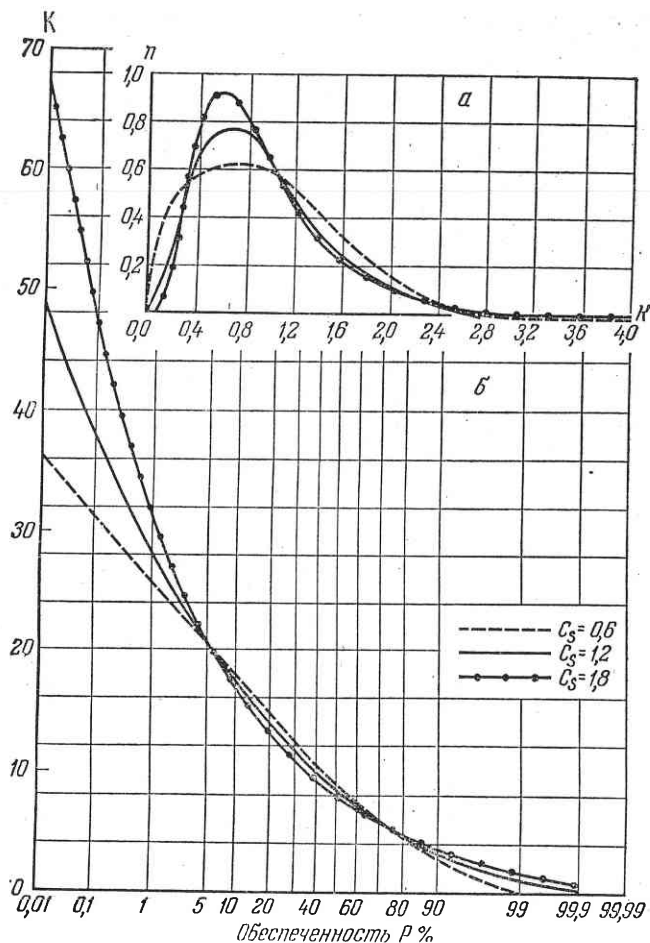


Рис. 22. Кривые распределения (а) и кривые обеспеченности (б)
С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля.

Обеспеченность наблюдаемых величин стока может быть определена по одной из следующих формул:

$$p = \frac{m-0,3}{n+0,4} 100\%, \quad (118)$$

$$p = \frac{m}{n+1} 100\%, \quad (119)$$

где p — обеспеченность наблюдаемой величины стока (эмпирическая обеспеченность);

m — порядковый номер члена ряда наблюдаемых величин стока, расположенных в порядке убывания;

n — общее число членов ряда.

При сравнительно коротких рядах наблюдений расхождения в значениях обеспеченности, вычисленных по приведенным формулам, наблюдается главным образом в первых членах ряда.

Формула (119) рекомендована (СНиП II-И. 7—65) для расчета максимальных расходов, как дающая наиболее осторожный вариант в отношении определения максимумов стока малой обеспеченности.

Более обоснованной следует признать формулу (118), применение которой рекомендуется для расчетов годового и минимального стока.

Если точки эмпирической обеспеченности, вычисленные по формуле (118) или (119) и нанесенные на график теоретической кривой обеспеченности, осредняют последнюю, значит, она построена правильно. Несоответствие эмпирических точек и теоретической кривой обеспеченности указывает на неправильность определения параметров кривой, в первую очередь на неточность в определении коэффициента асимметрии C_s . В этом случае необходимо изменить соотношение C_s и C_v и вновь построить теоретическую кривую обеспеченности.

Кривая обеспеченности стока, построенная в простых координатах, имеет большую кривизну в верхней и нижней частях. Это затрудняет пользование кривой и графическую экстраполяцию крайних участков кривой, представляющих наибольший интерес при гидрологических расчетах. Поэтому для построения кривой обеспеченности применяется специальная клетчатка вероятностей. Основное свойство клетчатки вероятностей состоит в том, что на ней кривая обеспеченности с коэффициентом асимметрии $C_s=0$ получает вид прямой. При других значениях C_s кривые обеспеченности, построенные на клетчатке вероятностей, имеют вид плавных линий. Причем кривизна их увеличивается с увеличением коэффициента асимметрии C_s .

Клетчатки вероятностей могут быть с обычной и логарифмической вертикальной шкалой. Первый тип клетчатки применяется для кривых с умеренной асимметрией ($C_s \leq 2C_v$), которая характерна для годовых величин стока, а второй тип — для кривых со значительной асимметрией ($C_s > 2C_v$).

При наличии длинного ряда наблюдений кривую обеспеченности можно получить, пользуясь формулой (118) или (119) для определения обеспеченности каждого члена ряда. Полученные точки наносят на клетчатку вероятностей и по ним проводят кривую, проходящую по точкам или занимающую среднее положение между ними. Построенная кривая экстраполируется до зоны наибольших и наименьших обеспеченностей.

Клетчатку вероятностей используют также для определения коэффициента асимметрии путем подбора.

Определение параметров теоретической кривой обеспеченности годового стока. Параметрами теоретической кривой обеспеченности являются три величины: среднее арифметическое ряда, коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s .

При расчете годового стока первый параметр кривой обеспеченности x представляет собой норму стока. Определение нормы стока при любой степени изученности бассейна было рассмотрено в §2 главы IV. Остановимся на возможных способах определения двух других параметров—коэффициентов вариации и асимметрии.

Коэффициент вариации годового стока при наличии данных продолжительных наблюдений определяют по теоретической формуле:

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{Q_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n-1}}, \quad (120)$$

где Q_0 — норма стока (в данном обозначении — расход, $\text{м}^3/\text{сек}$);

σ_Q — среднее квадратическое отклонение годового стока от его среднего значения;

K — модульный коэффициент, то есть отношение годового стока к его среднему значению, норме.

Относительная средняя квадратическая ошибка коэффициента вариации вычисляется по формуле:

$$E_{C_v} = \sqrt{\frac{1+C_v^2}{2n}} 100\%. \quad (121)$$

При большой изменчивости годового стока (величина $C_v > 0,5$), что характерно для рек засушливых районов, коэффициент вариации рекомендуется определять по методу наибольшего правдоподобия.

Метод наибольшего правдоподобия предложен английским математиком Р. Фишером в 20—30 гг. XX в. В практике гидрологических расчетов этот метод начал применяться только в последнее время в результате разработок, сделанных С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем.

Метод наибольшего правдоподобия заключается в том, что в качестве оценки для неизвестного параметра принимают такое его значение, при котором функция правдоподобия достигает наибольшего возможного значения для данного ряда.

Согласно методу наибольшего правдоподобия коэффициент вариации определяют в зависимости от параметра λ , представляющего собой среднее значение логарифмов модульных коэффициентов K :

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \lg K_i}{n-1}. \quad (122)$$

Значение коэффициента вариации в зависимости от параметра λ находится по таблице приложения 3.

Относительную среднюю квадратическую ошибку коэффициента вариации, определенного по методу наибольшего правдоподобия, можно установить в зависимости от величины C_v и числа лет наблюдений по таблице, приводимой в СН 371—67.

В соответствии с нормами ошибка C_v при расчетах годового стока не должна превышать следующих пределов (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3

Интервалы значений C_v	0,2—0,3	0,4—0,8	Больше 0,8
Допустимая средняя квадратическая ошибка C_v	20	10	5

Если относительная средняя квадратическая ошибка C_v превышает указанные в таблице 3 пределы, то ряд наблюдений недостаточен. В таком случае коэффициент вариации приводят к многолетнему периоду аналитическим или графо-аналитическим способом с использованием данных наблюдений по рекам-аналогам.

Аналитический способ приведения к многолетнему периоду состоит в определении C_v по уравнению регрессии:

$$C_{vN} = \frac{C_{vn}}{1-r^2 \left(1 - \frac{\sigma_{n,a}^2}{\sigma_{N,a}^2}\right)} \cdot \frac{Q_{ср. n}}{Q_{ср. N}}, \quad (123)$$

где N — индекс, означающий, что данная характеристика относится к многолетнему периоду;

n — индекс, показывающий, что данная характеристика относится к короткому периоду;

a — индекс, означающий, что данная характеристика относится к реке-аналогу;

r — коэффициент корреляции годового стока.

Нормами рекомендуется применять аналитический способ приведения при проектировании гидротехнических сооружений I и II классов капитальности в случае наличия параллельных наблюдений в расчетном створе и реке-аналоге в течение не менее 10 лет при коэффициенте корреляции годового стока не менее 0,8.

В остальных случаях приведение коэффициента вариации к многолетнему периоду выполняют графо-аналитическим методом. Сущность этого метода изложена ниже, так как он относится к определению всех трех параметров кривой обеспеченности.

Для совершенно неисследованных рек, то есть при полном отсутствии гидрометрических данных, коэффициент вариации годового стока определяют по карте изолиний, по методу аналогии или по эмпирическим формулам.

Определение C_v по карте изолиний аналогично определению по карте нормы стока. Карта коэффициентов вариации (рис. 23) пригодна для рек с площадями водосбора от 1000 до 50 000 км^2 при отсутствии озер или при озерности, не превышающей 2—3%.

Для площадей водосборов более 50 000 км^2 коэффициент вариации определяют по аналогии с другим изученным бассейном.

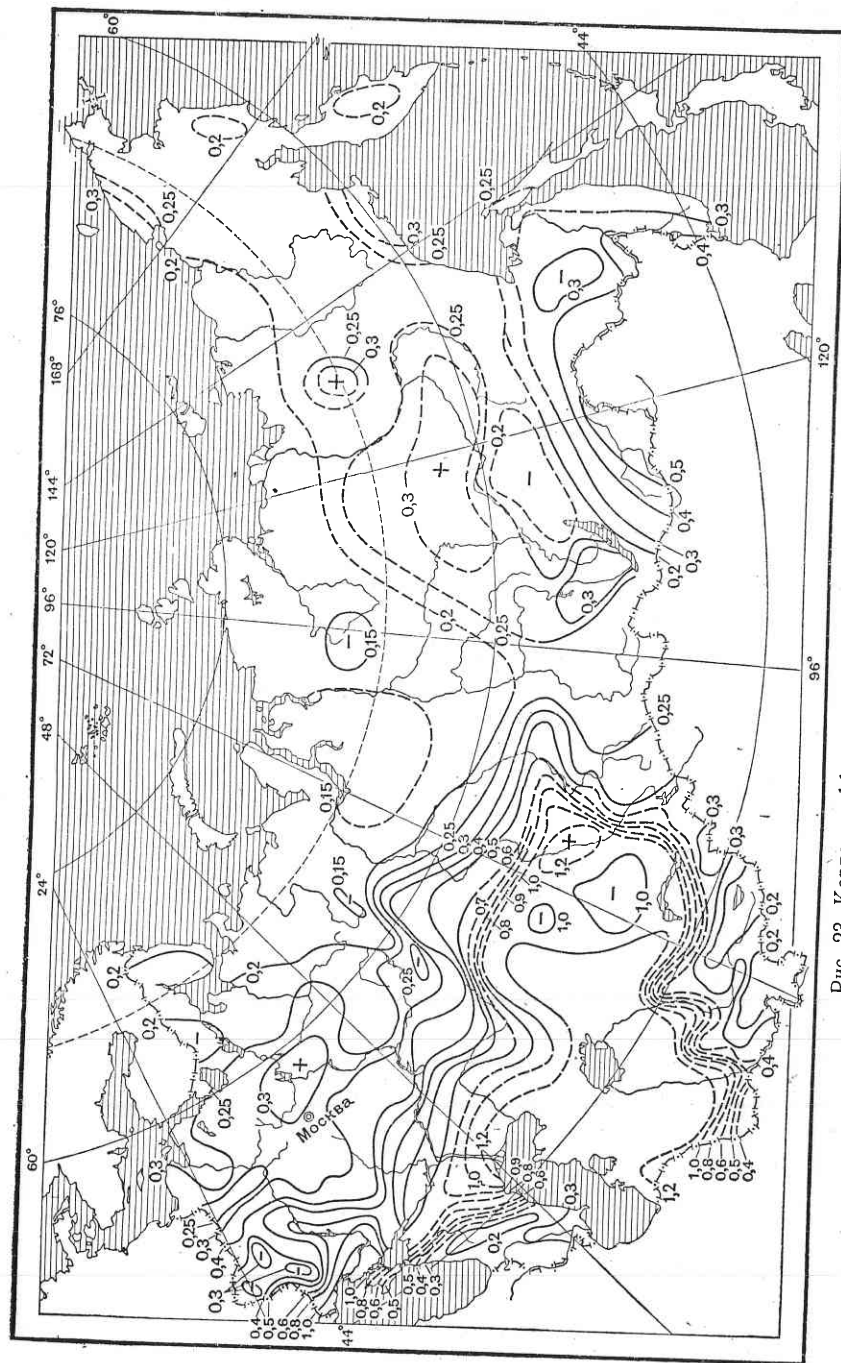


Рис. 23. Карта коэффициента вариации годового стока.

Расчет коэффициента вариации стока рек с площадями водосборов меньше 1000 км^2 выполняют по формуле:

$$C_v = C_{v,a} \frac{Q_{0,a}}{Q_0}, \quad (124)$$

где $C_{v,a}$ и $Q_{0,a}$ — коэффициенты изменчивости и норма стока для реки-аналога.

Для расчета коэффициента вариации годового стока в неизученных бассейнах разработан ряд эмпирических формул. Все эти формулы в явной или неявной форме учитывают зависимость коэффициента вариации от изменчивости по территории климатических факторов стока и от регулирующей роли речного бассейна.

Первая такая формула предложена в 1930 г. Д. Л. Соколовским для рек европейской части СССР:

$$C_v = a - 0,063 \lg (F + 1), \quad (125)$$

где a — параметр, учитывающий климатическую изменчивость стока, определяется по карте изолиний для центра тяжести бассейна. Значение климатического параметра a в формуле Д. Л. Соколовского М. Э. Шевелев впоследствии расшифровал так:

$$a = 0,78 - 0,29 \lg M_0, \quad (126)$$

где M_0 — норма стока, л/сек с 1 км^2 .

Формула (126) пригодна в диапазоне изменения нормы стока от 1,5 до 15 л/сек с 1 км^2 , то есть для большей части Советского Союза.

Для озерных районов, по предложению М. Э. Шевелева, вводится дополнительный член, учитывающий влияние озерного регулирования на коэффициент вариации, и формула принимает следующий вид:

$$C_v = 0,78 - 0,29 \lg M_0 - 0,063 \lg (F + 1) - 0,08 \lg (f_{оз} + 1). \quad (127)$$

Здесь $f_{оз}$ — площадь озер на водосборе в процентах от всей площади бассейна.

После этого был получен ряд других эмпирических зависимостей для определения C_v годового стока (формулы С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля, Н. Д. Антонова и др.). Однако наибольшее распространение в практике получила формула Д. Л. Соколовского, которой и рекомендуется пользоваться для определения C_v в неизученных озерных бассейнах формулой (127).

В результате анализа и обобщения большого количества данных по годовому стоку рек Советского Союза К. П. Воскресенский (1962 г.) получил общую для всей территории СССР эмпирическую формулу вида:

$$C_v = \frac{A}{M_0^{0,4} (F + 1000)^{0,1}}, \quad (128)$$

где A — параметр, определяемый методом аналогии, подстановкой в формулу известного для реки-аналога C_v .

Для горных районов C_v определяют по эмпирическим формулам, учитывающим среднюю высоту водосбора:

$$C_v = \frac{A_1}{H_{cp}^m}, \quad (129)$$

где H_{cp} — средняя высота водосбора, м;

A_1 — параметр формулы;

m — показатель степени кривой связи C_v и H_{cp} .

Значения A_1 и m определяют на основании обобщения данных по C_v и A_{cp} для изученных рек данного горного района.

Для определения коэффициента асимметрии C_s существует теоретическая формула, рассмотренная в главе 1:

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

Однако для ее применения необходимо иметь данные наблюдения более чем за 100 лет; при $n < 100$ формула дает большие погрешности.

При наличии данных по годовому стоку (не менее чем за 40 лет) коэффициент асимметрии C_s определяют методом подбора, исходя из условий наилучшего соответствия кривой обеспеченности годового стока данным наблюдений.

Подбор кривой обеспеченности, наиболее соответствующей эмпирическим точкам, выполняется графически или графо-аналитически. Графическим способом подбор C_s ведут на клетчатке вероятностей с нанесением на нее эмпирических точек, полученных по формуле (118). На клетчатку наносят теоретические кривые обеспеченности, построенные при одном и том же C_v , определенном по имеющемуся ряду наблюдений, и различных значениях C_s . Для первой кривой принимают $C_s = 2C_v$. Наиболее согласующуюся с эмпирическими точками кривую принимают за расчетную.

При отсутствии данных наблюдений значение коэффициента асимметрии C_s устанавливают по соотношению этого параметра с коэффициентом вариации для рек-аналогов. При отсутствии такой возможности принимают:

для зоны избыточного и переменного увлажнения (арктической, тундровой, лесной, лесостепной, степной) $C_s = 2C_v$;

для зоны недостаточного увлажнения при наличии лет с почти полным отсутствием стока (сухостепной, пустынной) $C_s = (1,5-1,8) C_v$.

Графо-аналитический способ определения и приведения к длительному периоду наблюдений параметров кривой обеспеченности. В 1960 г. Г. А. Алексеев предложил подбирать значения параметров кривой обеспеченности по эмпирическим кривым, построенным по имеющемуся ряду годовых величин стока. Подбор параметров по эмпирическим кривым назван графо-аналитическим способом. Сущность способа состоит в следующем.

По формуле (118) строят на клетчатке вероятностей эмпирическую кривую обеспеченности. На этой кривой выбирают три опорные точки, через которые должна пройти искомая теоретическая кривая обеспеченности. Например, можно взять ординаты эмпирической кривой, соответствующие обеспеченностям: 5, 50 и 95%, то есть Q_5 , Q_{50} , Q_{95} .

Ординаты теоретической биномиальной кривой, как известно, определяются с помощью таблиц Рыбкина по формуле:

$$K_p = 1 + C_v \Phi(p, C_s), \quad (130)$$

где Φ — отклонение ординаты кривой обеспеченности от середины при $C_v = 1$ и заданной величине C_s ; $\Phi = f(p, C_s)$.

Заменяя модульный коэффициент K_p через отношение $\frac{Q_p}{Q_0}$ и $C_v = \frac{\sigma_Q}{Q_0}$, выражение (130) можно переписать так:

$$Q_p = Q_0 + \sigma_Q \Phi(p, C_s). \quad (131)$$

Из условия, что теоретическая кривая обеспеченности (131) должна пройти через опорные точки эмпирической кривой, можно получить три уравнения:

$$Q_0 + \sigma_Q \Phi(p_5, C_s) = Q_5; \quad (132)$$

$$Q_0 + \sigma_Q \Phi(p_{50}, C_s) = Q_{50}; \quad (133)$$

$$Q_0 + \sigma_Q \Phi(p_{95}, C_s) = Q_{95} \quad (134)$$

с тремя неизвестными:

$$Q_0, \sigma_Q \text{ и } C_s.$$

Из математической статистики известно, что асимметричность биномиальной кривой распределения характеризуется коэффициентом скошенности, который находят по выражению:

$$S = \frac{x_{p_1} + x_{p_3} - 2x_{p_2}}{x_{p_1} - x_{p_3}} = \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{Q_5 - Q_{95}}. \quad (135)$$

Подставляя сюда выражения (132) — (134) и произведя упрощения, получаем однозначную зависимость $S = f(C_s)$ биномиальной кривой распределения:

$$S = \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{\Phi_5 - \Phi_{95}} = f(C_s). \quad (136)$$

На основании формулы (136) составлена таблица (см. приложение 4), позволяющая определять C_s по коэффициенту скошенности.

Для нахождения σ_Q вычтем из уравнения (132) уравнение (134), получим:

$$Q_0 + \sigma_Q \Phi(p_5, C_s) - Q_0 - \sigma_Q \Phi(p_{95}, C_s) = Q_5 - Q_{95},$$

или

$$\sigma_Q [\Phi(p_5, C_s) - \Phi(p_{95}, C_s)] = Q_5 - Q_{95},$$

отсюда

$$\sigma_Q = \frac{Q_5 - Q_{95}}{\Phi_5 - \Phi_{95}} \quad (137)$$

Из уравнения (133) найдем значение среднего арифметического:

$$Q_0 = Q_{50} - \sigma_Q \Phi(p_{50}, C_s),$$

или

$$Q_0 = Q_{50} - \sigma_Q \Phi_{50}. \quad (138)$$

Значения Φ_5 , Φ_{50} , Φ_{95} , входящие в формулы (137) и (138), определяют по приложению А.

На основании полученных величин σ и Q_0 вычисляем коэффициент вариации:

$$C_v = \frac{\sigma_Q}{Q_0}.$$

Точность определения изложенным способом параметров кривой обеспеченности зависит от обоснованности проведения эмпирической кривой. При небольшой длине ряда ошибка может быть значительной, особенно при сильной изменчивости годового стока. Поэтому при коротком ряде наблюдений параметры приводят к многолетнему периоду по реке-аналогу. Приведение осуществляется по графику связи равнообеспеченных величин годового стока. С этой целью годовые величины стока в обоих бассейнах (изучаемом и аналогичном) за период совместных наблюдений выписывают в порядке убывания и по ним строят график связи. По многолетним наблюдениям в аналоге строят эмпирическую кривую обеспеченности годового стока, с которой снимают три опорные ординаты: $Q_{5,a}$, $Q_{50,a}$ и $Q_{95,a}$. Пользуясь графиком связи равнообеспеченных величин стока, по опорным точкам кривой бассейна-аналога находят соответственно три опорные точки в изучаемом бассейне Q_5 , Q_{50} , Q_{95} . Дальнейший расчет параметров кривой обеспеченности стока в бассейне с коротким рядом наблюдений ведут в порядке, описанном ранее.

Установление хронологического ряда годовых расходов с помощью кривых обеспеченностей. При водохозяйственных расчетах иногда возникает необходимость в теоретическом определении годового стока для хронологического ряда последовательных лет при отсутствии данных наблюдений.

Решение этой задачи было предложено Г. П. Ивановым. Оно основано на допущении: на близко расположенных бассейнах одного физико-географического района (равнинной территории) в одни и те же календарные годы наблюдается годовой сток одинаковой обеспеченности.

Допустим, что в равнинной части СССР находятся рядом два бассейна с аналогичными условиями климата и ландшафта. На одном из них имеется ряд среднегодовых расходов за продолжительный период. В другом бассейне данные наблюдений отсутствуют. Требуется определить среднегодовые расходы в этом бассейне за ряд лет.

С этой целью строят кривые обеспеченности годового стока в обоих бассейнах. В первом бассейне, где имеются данные наблюдений, параметры теоретической кривой обеспеченности ($Q_{0,a}$, $C_{v,a}$ и $C_{s,a}$) определяют по этим данным. По найденным параметрам, пользуясь таблицами Рыбкина или трехпараметрическим гамма-распределением, строят теоретическую кривую обеспеченности годового стока в модульных коэффициентах: $K_p = f(p)$.

Во втором — не изученном — бассейне параметры кривой обеспеченности приходится определять при отсутствии наблюдений, а именно: Q_0 по карте изолиний; C_v — по карте изолиний или по эмпирической формуле; а $C_s = 2C_v$.

Таким образом и для неизученного бассейна можно построить теоретическую кривую обеспеченности годового стока $K'_p = f(p)$.

По предложению Г. П. Иванова, обеспеченность среднегодовых расходов для одних и тех же лет считают одинаковой в обоих бассейнах. Для каждого имеющегося расхода в изученном бассейне вычисляют $K_a = \frac{Q_a}{Q_{0,a}}$ и по кривой обеспеченности стока в этом бассейне находят его обеспеченность p_1 . Откладывая значения p_1 на второй кривой обеспеченности, находят соответствующий ей модульный коэффициент K_1 . Расход воды за этот год в неизученном бассейне определится как $Q_1 = K_1 Q_0$. Так можно получить расходы в неизученном бассейне за все годы, за которые имеются наблюдения в изученном бассейне.

§ 4. Внутригодовое распределение стока

Установление закономерностей внутригодового хода стока рек имеет важное научное и практическое значение, так как на его основе ведется планирование использования водных ресурсов для различных водохозяйственных целей, определяются основные параметры гидротехнических сооружений.

Вместе с тем установить распределение стока в году очень сложно при гидрологических расчетах. Это объясняется тем, что на внутригодовое распределение стока влияет целый ряд физико-географических факторов, количественный учет которых часто затруднен.

В первую очередь распределение стока зависит от изменения в течение года осадков и температуры воздуха, а следовательно, и испарения. Климатические факторы имеют географическую зональность, что позволило разработать классификацию рек по внутригодовому распределению стока. Наиболее обоснованной в настоящее время является классификация Б. Д. Зайкова (см. главу III).

Кроме климатических, на распределение стока влияют другие физико-географические факторы, выражающие естественную зарегулированность стока в бассейне. К этой группе факторов относятся: размер и рельеф бассейна, гидрогеологическое строение его, озерность, залесенность, заболоченность. В общем случае с увеличением зарегулированности стока распределение его в течение года выравнивается: уменьшается величина паводков и увеличиваются расходы в межень.

Наибольшей регулирующей способностью обладают озера, задерживающие большие количества талых и ливневых вод, что приводит к растягиванию половодья или паводка и уменьшению максимальных расходов. В период межени происходит подпитывание реки из озера и минимальный сток увеличивается. Таким образом, озера выравнивают сток в течение года. Регулирующая способность озер зависит от их площади и расположения в бассейне. Более эффективно действие озер, расположенных в нижней части бассейна.

Влияние леса на распределение стока в году состоит в увеличении продолжительности половодья (вследствие удлинения снеготаяния) и в перераспределении поверхностного и подземного стока. Лесные почвы обладают большой инфильтрационной способностью, благодаря чему часть поверхностного стока переходит в подземный, попадающий в реку в период межени. В связи с этим в лесных бассейнах наблюдается снижение половодного и повышение меженного стока.

Почвенно-геологические условия также играют значительную роль в распределении годового стока. Если почвы в бассейне водопроницаемые, то большая часть выпавших осадков просачивается в землю и идет на пополнение запасов грунтовых вод. Наличие в бассейне мощных водоносных горизонтов, дренируемых рекой, приводит к увеличению меженного стока, а следовательно, к выравниванию годового стока.

С увеличением площади бассейна река обычно дренирует более глубокие и водообильные водоносные горизонты. Поэтому площадь бассейна является косвенным показателем подземного питания и меженного стока (выравниваемости внутригодового распределения стока).

Распределение стока в году может значительно измениться в результате хозяйственной деятельности человека: строительства прудов и водохранилищ, осушения болот, устройства лесозащитных полос, проведения агротехнических мероприятий.

Основное назначение прудов и водохранилищ состоит в регулировании стока, то есть в его перераспределении из многоводных сезонов (весна и осень) в маловодные (лето) с целью использования накопленной воды для орошения, водоснабжения, энергетики и т. д. Водохранилища, как и озера, увеличивают продолжительность весеннего половодья и повышают меженный сток.

Осушение болот путем проложения каналов и дренажей приводит к снижению уровня грунтовых вод, в результате чего увеличивается мощность деятельного аккумуляющего слоя. Под действием осадки, уплотнения и разложения торфа уменьшаются коэффициенты фильтрации. Вследствие этого на осушенных болотах задерживаются талые и дождевые воды, медленно срабатываясь в меженный период, что вызывает снижение максимальных расходов и увеличение минимальных.

Влияние лесозащитных полос на распределение стока в году аналогично влиянию леса, но оно сказывается несколько сильнее благодаря целесообразному размещению растительности по водосбору.

Влияние агротехнических мероприятий (травопольной системы земледелия, обработки почвы, обвалования, снегозадержания и др.)

состоит в задержании влаги на полях и пополнении запасов грунтовых вод, что приводит к уменьшению весеннего стока и увеличению меженного, то есть к выравниванию стока в течение года.

Внутригодовое распределение стока для какого-либо пункта реки не остается постоянным, а изменяется из года в год и притом весьма значительно.

Задачи и способы расчета внутригодового распределения стока зависят прежде всего от его назначения и схемы использования. Так, для проектирования орошения основной интерес представляет распределение стока в вегетационный период, при энергетическом использовании наибольший интерес представляет обычно зимняя межень; при судоходном использовании — период навигации и т. д.

Расчет внутригодового распределения стока зависит также от типа его распределения в году. Например, для рек засушливых районов, где весеннее половодье составляет 95% годового стока и более, основная водохозяйственная задача состоит в задержании весеннего стока, а расчет внутригодового распределения сводится к построению гидрографа весеннего половодья, в соответствии с которым устанавливаются основные параметры водохранилищ.

Таким образом, расчет внутригодового распределения стока заключается в составлении или выборе из множества возможных для данного пункта случаев одного или нескольких расчетных, удовлетворяющих требованиям проектирования. При этом необходимо исходить из анализа формирования внутригодового режима стока под воздействием определяющих физико-географических факторов.

Наиболее правильным с генетической точки зрения методом расчета внутригодового распределения стока является метод водного баланса. При этом уравнение водного баланса необходимо решить относительно y (стока) для каждого месяца или сезона года:

$$y = x - E \pm u, \quad (139)$$

где x — осадки;

E — суммарное испарение;

u — аккумуляционный член, включающий в себя накопление и стайвание снега и льда, накопление и расходование почвенных и грунтовых вод и изменение запасов воды в поверхностных водоемах (в русле и пойме) и на поверхности водосбора.

При рассмотрении внутригодового распределения стока аккумуляционный член играет значительную роль, в некоторых случаях даже большую, чем члены x и E в уравнении (139). Определение же величины u практически представляет большие трудности ввиду того, что еще очень слабо развиты необходимые для этого сетевые наблюдения за запасами влаги в почве, в грунтовых водах и др.

Затруднения встречаются также при определении величины суммарного испарения для коротких промежутков времени.

Поэтому метод водного баланса, несмотря на полную теоретическую ясность его, в расчетах внутригодового режима стока пока не

получил широкого применения. В настоящее время более развиты способы расчета внутригодового распределения стока, основанные на изучении закономерностей распределения стока и применении методов математической статистики.

Возможны два способа представления характеристик внутригодового распределения стока: календарное — по различным интервалам времени (сезон, месяц, декада, сутки) и в порядке убывания расходов (месячных, декадных или суточных), то есть в виде кривой продолжительности (обеспеченности) расходов. Кривая продолжительности является более устойчивой характеристикой, менее зависящей от индивидуальных особенностей режима стока в отдельные годы. Недостатком ее является отсутствие представления о календарной последовательности. Поэтому кривая продолжительности может применяться в водохозяйственных расчетах на первых стадиях проектирования.

Более подробные расчеты следует составлять на основании данных о календарном внутригодовом распределении.

§ 5. Расчет внутригодового распределения стока при наличии данных гидрометрических наблюдений

Основным способом расчета календарного внутригодового распределения стока является метод компоновки.

При наличии продолжительного периода наблюдений (не менее чем 20 лет) расчетное распределение стока в году может быть подобрано по реальному году.

В тех случаях, когда по условию проектирования потребление воды изменяется в течение года незначительно, возможно применение кривой продолжительности суточных расходов.

Метод компоновки. Разработкой этого метода занимались Г. И. Швец, И. М. Лифшиц, В. Г. Андреянов и другие ученые. Однако наиболее полные и детальные исследования этого вопроса принадлежат В. Г. Андреянову.

Расчет внутригодового распределения стока по методу компоновки делится на две части:

- 1) межсезонное распределение, имеющее наиболее важное значение и рассчитываемое более точно;
- 2) внутрисезонное распределение (по месяцам или декадам), устанавливаемое более приближенно, с некоторой схематизацией.

Такое деление вызывается тем, что распределение стока внутри какого-либо гидрологического сезона зависит от его водности, а не от водности года или другого сезона. Например, равномерное распределение стока летом и осенью имеет место при низкой водности, так как в этом случае сток в основном определяется устойчивым грунтовым питанием, и, наоборот, неравномерное распределение соответствует большой водности сезона, обусловливаемой наличием дождей паводков.

1. Межсезонное распределение стока не остается постоянным из года в год, и его исследование и расчет можно вести

методами математической статистики, обычно применяемыми при исследованиях варьирующих величин. Незначительными коррелятивными связями между сезонным стоком смежных лет можно пренебречь.

При исследовании же многолетних колебаний сезонного стока совместно для всех сезонов года необходимо учитывать обязательное равенство годовому стоку суммы сезонных величин и наличие коррелятивной связи между смежными сезонами, которая в большинстве случаев бывает более тесной, чем связь годового стока смежных лет.

Статистические расчеты легко выполнить для суммы двух слагаемых, связанных между собой коррелятивно.

Поэтому для исследований и расчета межсезонного распределения стока целесообразно делить год на два основных периода: многоводный и маловодный.

Выделение периодов зависит от типа распределения стока в году. С целью большей детализации межсезонного распределения, необходимого для практических задач проектирования, один из периодов можно разделить, в свою очередь, на два сезона. Всего в году должно быть не более трех сезонов. В зависимости от типа внутригодового распределения стока и целей использования один из периодов принимается лимитирующим.

Лимитирующий — это критический период в отношении использования стока, то есть период, в котором создаются неблагоприятные условия работы водохозяйственной установки. Внутри лимитирующего периода может быть выделен лимитирующий сезон. Так, для рек с весенним половодьем при энергетическом использовании их следует выделить два периода: многоводный — весна и маловодный — межень; лимитирующим периодом будет межень, включающий в себя два сезона: летне-осенний и зимний. Наиболее неблагоприятные условия для работы гидроэлектростанции будут зимой. Поэтому зимний сезон является лимитирующим. При использовании стока рек с весенним половодьем для целей орошения лимитирующим сезоном будет летне-осенний.

Для высокогорных рек с летним половодьем при ирригационном использовании их выделяют многоводный период (лето) и маловодный (осень — зиму и весну). В лимитирующем периоде межени за лимитирующий сезон принимают весенний.

В соответствии с делением года на сезоны расчет внутригодового распределения стока ведут не по календарным годам, а по водохозяйственным, которые начинаются с многоводного периода.

Сроки сезонов назначают едиными для всех лет ряда с округлением их до целого месяца. Продолжительность многоводного сезона следует назначать так, чтобы в принятых границах помещалось фактическое половодье за все годы, как с наиболее ранним сроком его наступления, так и с наиболее поздним сроком окончания.

Выяснив границы сезонов, определяют величины сезонных стоков путем суммирования в каждом году месячных расходов, соответствующих данному сезону. Например, если весенний период включает март,

апрель и май, то, суммируя расходы каждого года за эти месяцы, получают ряд весенних величин стока. Точно так же можно подсчитать сток за период межени и за каждый сезон межени.

Колебания сезонных величин стока и годового стока устанавливают путем построения теоретических кривых обеспеченностей, которые определяются параметрами $\bar{x}$, C_v и C_s . Первые два параметра вычисляют непосредственно по полученным рядам стока сезонных величин и годового. Величину C_s лучше подбирать по соответствию кривой обеспеченности эмпирическим точкам.

В зависимости от целей использования стока выбирают расчетную обеспеченность стока в соответствии с нормами СН 346—66.

На основании полученных кривых обеспеченности можно установить величины сезонного и годового стоков расчетной обеспеченности. При этом сумма сезонных стоков не будет равна годовому стоку той же обеспеченности. Это объясняется различием в степени изменчивости стока по сезонам и за год (различием C_v) и наличием коррелятивной, а не функциональной связи между величинами сезонного стока.

Для соблюдения равенства годового стока сумме стока за отдельные сезоны В. Г. Андриянов рекомендует принимать одинаковую обеспеченность (или водность) годового стока и стока лимитирующего периода. Сток нелIMITирующего периода определяют как разность между стоком за год и стоком лимитирующего периода.

Сток за лимитирующий сезон должен также соответствовать заданной обеспеченности. Тогда сток за нелIMITирующий сезон определится по разности между стоком лимитирующего периода и сезона.

Например, для равнинных рек с весенним половодьем при энергетическом их использовании лимитирующий период — межень, а лимитирующий сезон — зима. Принимая одинаковую обеспеченность, равную расчетной для года и межени, по кривым обеспеченности находят расчетные величины стока за год $Q_{г.р}$ и за межень $Q_{м.р}$. Сток за весенний период равен:

$$Q_v = Q_{г.р} - Q_{м.р} \quad (140)$$

Сток за летне-осенний сезон также можно рассчитать, исходя из поставленного требования, чтобы зимний сток соответствовал расчетной обеспеченности. По кривой обеспеченности зимнего стока находим $Q_{з.р}$. Величина стока за летне-осенний период межени равна:

$$Q_{л-о} = Q_{м.р} - Q_{з.р} \quad (141)$$

Обеспеченность весеннего стока и летне-осеннего периода можно определить по кривым обеспеченности стока для этих сезонов. Она получится отличной от расчетной обеспеченности.

Таким образом, в результате расчета межсезонного распределения стока получают величины стока за каждый сезон и за год. В приведенном примере даны $Q_{г.р}$, Q_v , $Q_{л-о}$, $Q_{з.р}$.

Изложенная схема расчета межсезонного распределения стока по условию равнообеспеченных лимитирующих периодов применима для

разных сочетаний типа распределения и характера использования стока.

2. Внутрисезонное распределение стока зависит от водности сезона. Поэтому расчет внутрисезонного распределения следует вести отдельно для различных групп водности. Практически достаточно принять три градации водности: многоводную, к которой относится сток с обеспеченностью $p < 33\%$, среднюю — с обеспеченностью от 33 до 66% и маловодную — с обеспеченностью $p > 66\%$.

Для периода межени определяют помесечное распределение стока. В период половодья ввиду значительной внутримесячной неравномерности стока рекомендуется вести расчет по декадам.

Для каждого сезона величины сезонного стока размещают по вертикали в порядке убывания и вычисляют их эмпирическую обеспеченность; за каждый год по горизонтали выписывают месячные (или декадные для весеннего половодья) величины стока в порядке убывания, а также соответствующие им календарные месяцы (или декады).

В соответствии с величинами эмпирической обеспеченности ряд сезонных величин стока (по вертикали) разбивают на три группы водности, при этом количество членов ряда в каждой группе должно быть примерно одинаковым.

Для каждой градации водности сезона суммируют месячные (декадные) расходы с одинаковым порядковым номером внутри сезона, а также подсчитывают суммы месячных расходов за сезон. Путем деления полученных сумм расходов за каждый месяц на сумму расходов за сезон находят относительное распределение стока по месяцам (в процентах от стока за сезон). Затем определяют таким же образом среднее распределение стока по месяцам (декадам) по всем группам водности.

Устанавливают, какие календарные месяцы и сколько раз встречались для каждого порядкового номера месяца. Относительная величина месячного стока (в процентах от сезонного) относится к тому календарному месяцу, который встречается наиболее часто для данного порядкового номера месяца.

Иногда возможно несколько вариантов календарной последовательности. В этом случае предпочтение отдают варианту с постепенным увеличением или уменьшением стока.

Умножая процентное внутрисезонное распределение стока на величины стока за сезон, получаем величины месячных и декадных расходов за год расчетной обеспеченности.

Полученное таким образом распределение стока в году является расчетным и не содержит в себе индивидуальных особенностей, свойственных отдельным реальным годам.

Указаниями СН 371—67 метод компоновки рекомендуется применять для расчетов внутригодового распределения стока при наличии данных наблюдений не меньше чем за 10 лет при условии, что в этот период входят как маловодные, так и многоводные и средневодные годы.

Метод реального года. Этот метод состоит в том, что из числа фактических гидрографов в качестве расчетного выбирают тот, у которого обеспеченность годового стока, лимитирующего периода и сезона близки к расчетной обеспеченности. Для этого величины годового стока и стока за лимитирующий период и сезон выписывают в порядке убывания и вычисляют их эмпирическую обеспеченность по формуле:

$$p = \frac{m-0,3}{n+0,4} 100\%.$$

В результате анализа полученных данных выбирают реальный гидрограф, соответствующий поставленному требованию равенства обеспеченности годового стока и стока лимитирующего периода расчетной обеспеченности. Если необходимо отобрать маловодный год, то есть если расчетная обеспеченность имеет значение, например, 75 или 95%, то анализируются только маловодные годы с обеспеченностью от 67 до 100% (последняя треть убывающего ряда расходов).

При выборе гидрографа необходимо обращать внимание на то, чтобы очертание его было бы типичным для данного района.

В выбранном реальном гидрографе определяют процентное помесечное распределение стока. Расчетный годовой сток $Q_{г.р.}$, найденный по кривой обеспеченности, распределяется по месяцам в соответствии с процентным распределением в реальном году.

Полученное таким образом реальное распределение стока, приведенное к году заданной обеспеченности, принимают в качестве расчетного распределения.

Выбрать расчетный гидрограф по способу реального года можно обоснованно только при большом числе наблюдений — порядка 20 лет и более. При меньшем периоде наблюдений относительная водность года и сезона (обеспеченность) не может быть достаточно надежно установлена исходя из номера в порядке убывания. Так, при коротком ряде наблюдений может оказаться, что все имеющиеся годы наблюдений являются маловодными и из их числа нельзя выбрать ни среднего, ни многоводного года, а только маловодный год.

§ 6. Построение кривой обеспеченности суточных расходов воды

Как уже отмечалось, распределение стока в течение года может быть представлено не только в виде хронологического хода расходов по месяцам или сезонам, но также в виде кривых продолжительности или обеспеченности средних суточных расходов. Кривая обеспеченности суточных расходов показывает продолжительность стояния расходов, превышающих данный или равных ему; она отражает распределение расходов в течение года. Кривая же обеспеченности средних годовых расходов, максимальных, минимальных и других характеризует распределение их в многолетней перспективе.

Кроме того, кривая обеспеченности суточных расходов имеет твердо установленные концы кривой, то есть абсолютный максимум и абсолютный минимум известны, и задача построения кривой обеспеченности

суточных расходов сводится к определению расходов различной продолжительности стояния.

Основной же задачей построения кривых обеспеченности годовых расходов, максимальных или минимальных расходов является их экстраполяция для определения расходов редкой повторяемости. В этом состоит существенное различие этих двух видов кривой обеспеченности.

Существует два способа построения кривой обеспеченности средних суточных расходов: построение обобщенной, или абсолютной, кривой и построение средней кривой.

Построение обобщенной, или абсолютной, кривой обеспеченности суточных расходов было предложено Д. И. Кочериным. Для построения обобщенной кривой среднесуточные расходы за весь период наблюдений (n лет) располагают в порядке убывания от абсолютного максимума до абсолютного минимума и для каждого расхода вычисляют его эмпирическую обеспеченность по одной из формул, приведенных ранее. Обобщенная кривая, по мнению Д. И. Кочерина, характеризует абсолютную изменчивость стока за многолетний период. Однако построение обобщенной кривой довольно трудоемко, особенно при наличии продолжительных наблюдений. При наличии данных наблюдений всего лишь за 10 лет приходится располагать в порядке убывания $365 \cdot 10 = 3650$ расходов.

Среднюю кривую обеспеченности суточных расходов строят по средним значениям расходов воды различной обеспеченности, полученным по кривым обеспеченности за отдельные годы.

Построение средней кривой обеспеченности для изученных рек не представляет труда в связи с опубликованием нового Водного кадастра СССР. Во второй серии Водного кадастра под названием «Основные гидрологические характеристики» в фондовой таблице приведены данные характерных среднесуточных расходов воды, а именно расходы продолжительностью 30 дней (или обеспеченность 8,3%), 90 дней (обеспеченность 25%), 180 дней (обеспеченность 50%), 270 дней (обеспеченность 75%), 355 дней (обеспеченность 97%), а также годовой максимум и минимум. Эти расходы приведены как за отдельные годы, так и за весь период наблюдений (включая 1962 г.). Осредненные значения характерных расходов и представляют собой ординаты средней кривой обеспеченности суточных расходов.

Сопоставление обобщенной и средней кривой обеспеченности суточных расходов показывает, что в пределах от 10 до 90% обеспеченности обе кривые очень близки. Крайние же участки кривых значительно различаются. В верхней части обобщенная кривая идет выше, а в нижней части ниже средней кривой (рис. 24).

Д. Л. Соколовский считает, что приближенно обобщенная кривая обеспеченности суточных расходов может быть получена из средней кривой путем графической экстраполяции средней кривой обеспеченности от расходов 10- и 90%-ной обеспеченности к абсолютному максимуму и минимуму.

Средняя кривая обеспеченности суточных расходов дает представление о распределении расходов в течение года от среднего максималь-

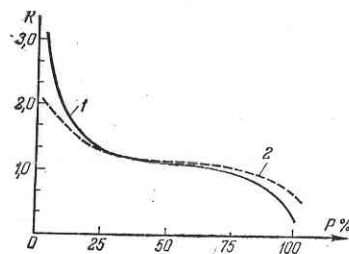


Рис. 24. Кривые обеспеченности среднесуточных расходов: 1 — обобщенная; 2 — средняя.

ного до среднего-минимального за многолетний период, то есть в пределах некоторого среднего по водности года. В связи с этим более близкой к некоторому реальному распределению стока можно считать среднюю кривую обеспеченности, дающую характеристику среднего типового распределения стока, примерно соответствующего типовому гидрографу, полученному путем осреднения расходов по одинаковым фазам режима.

В практике водохозяйственных расчетов при установлении расчетного рас-

хода ГЭС или определении средней многолетней выработки электроэнергии обычно пользуются обобщенной кривой обеспеченности. В других случаях для характеристики среднего внутригодового распределения стока можно использовать среднюю кривую обеспеченности. Недостатком кривой обеспеченности суточных расходов является отсутствие представления о календарной последовательности расходов.

§ 7. Расчет внутригодового распределения стока при отсутствии или недостаточности данных гидрометрических наблюдений

При отсутствии или недостаточности данных наблюдений расчет внутригодового распределения стока ведут:

- а) по методу гидрологической аналогии;
- б) по существующим районным схемам характеристик внутригодового распределения стока.

Основным методом расчета внутригодового распределения стока неизученных или недостаточно изученных рек равнинной территории является метод гидрологической аналогии. Ввиду большого числа факторов, влияющих на распределение стока, выбор аналога по внутригодовому распределению стока более затруднен, чем при других гидрологических расчетах.

Предварительно реку-аналог намечают по сходству климатических условий, таких, как рельеф, гидрогеологическое строение, почвогрунты, залесенность, заболоченность, озерность и других факторов, обуславливающих естественную зарегулированность стока.

Окончательно аналог выбирают в результате сопоставления годовых, сезонных и месячных величин стока по рассматриваемой реке и реке-аналогу за совместный период наблюдений.

При полном отсутствии данных наблюдений для обоснованного выбора аналога необходимо провести одновременные гидрометрические наблюдения за год на рассматриваемой реке и реке-аналоге. Также должно быть проведено полевое гидрометрическое обследование в отношении продолжительности половодья и дождевых паводков, максимальных уровней, пересыхания, промерзания и других характеристик речного бассейна.

При отсутствии полной аналогии в расчеты внутригодового распределения стока вводят поправки на неполноту аналогии.

Расчет внутригодового распределения стока при отсутствии или недостаточности гидрометрических наблюдений ведут по рассмотренному ранее методу компоновки, но параметры распределения (норма годового стока, сезонного и лимитирующего периода, коэффициент вариации годового и сезонного стоков и т. д.) определяют по аналогии с другой рекой, на которой проводились длительные гидрометрические наблюдения.

Если площади водосбора неизученной реки и реки-аналога близки по величине, а распределение стока по месяцам и сезонам за годы совместных наблюдений отличается незначительно, то допускается непосредственное перенесение процентного распределения стока в аналоге (полученное на основании данных наблюдений по методу компоновки) на рассматриваемую реку.

Для равнинных рек с большим количеством озер, а также для горных рек, где на распределение стока в большой мере влияет высота водосбора, подобрать аналог с близким значением ведущих факторов (озерности, высоты водосбора) обычно не удастся.

В таких случаях для расчета внутригодового распределения стока по группе изученных рек устанавливают зависимости основных параметров распределения стока (норма стока для сезонов, года и лимитирующего периода, коэффициент вариации годового стока, отношение коэффициента вариации сезонного и годового стока и т. д.) от озерности для равнинных рек или от высоты водосбора для горных рек.

Внутригодовое распределение стока неизученной реки в некоторых случаях может быть установлено приближенно по существующим районным схемам распределения стока по месяцам и сезонам (в процентах от годового стока), полученным по данным наблюдений для различных лет водности. Использование районных схем возможно только после проведения полевого обследования реки и проведения кратковременных гидрометрических наблюдений, устанавливающих отсутствие аномальных для этого района физико-географических условий.

Глава V. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

§ 1. Основные предпосылки к выявлению механизма процессов стока

Стекание, поверхностная аккумуляция, инфильтрация. Явление поверхностного стока, по Н. Е. Долгову, состоит из следующих четырех фаз.

Первая фаза при выпадении дождя характеризуется отсутствием поверхностного стока. Все выпадающие осадки идут на заполнение углублений и неровностей почвы (поверхностную аккумуляцию) и на просачивание в почву (инфильтрацию); часть осадков задерживается на ветвях, листьях и стеблях растений. Эта фаза называется бессточной или фазой полного бассейнового задержания. Продолжительность ее обозначим через τ_1 (рис. 25).

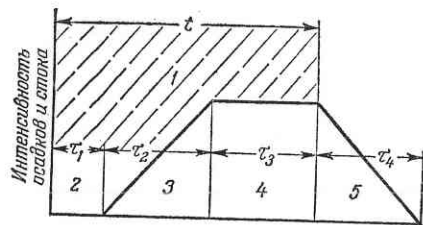


Рис. 25. Схема формирования ливневого паводка (по Н. Е. Долгову):

1 — дождь; 2 — начальная фаза; 3 — фаза подъема; 4 — фаза полного стока; 5 — фаза спада.

площади бассейна. Поглощение воды почвой постепенно уменьшается. Эта фаза заканчивается в момент прекращения дождя.

Четвертая фаза (спад продолжительностью t_4) представляет явление стока после прекращения дождя до окончания стока.

Так можно представить схему формирования стока при условии одинаковой за время дождя его интенсивности и равномерного распределения дождя по площади. В действительности явление дождевого стока происходит значительно сложнее из-за неравномерности дождей и охвата ими площади бассейнов. Большую роль в процессах стока играют грунты (их структура, водопроницаемость), определяющие величину просачивания. Кроме того, величина просачивания зависит от предшествующей увлажненности грунта.

По исследованиям Н. Е. Долгова, поверхностный сток в южных районах Украины образуется только при интенсивности дождя больше 0,5 мм/мин и при общем слое выпавших осадков более 15 мм. Наблюдениями в других физико-географических районах получены примерно такие же величины (15—20 мм) потерь осадков на смачивание почвы и растительности, на заполнение углублений. К первоначальным потерям относится также испарение выпавших осадков. Однако величина этих потерь незначительна по сравнению с просачиванием воды в грунт.

Таким образом, летом все фазы стока могут наблюдаться только при длительных и интенсивных дождях.

Процесс формирования поверхностного стока при таянии снега аналогичен рассмотренному. В первые моменты таяния снега вся вода задерживается в самом снеге или в неровностях и углублениях бассейна, то есть также наблюдается первоначальная бессточная фаза. На заполнение неровностей и углублений может расходоваться значительный слой воды, которая получается от таяния снега. Затем, как и при дожде, наступают фазы начала поверхностного стока, полного стока и спада.

Наличие промерзшего слоя грунта или ледяной корки в значительной степени уменьшает просачивание. В отличие от дождей наибольшие потери на просачивание наблюдаются в конце снеготаяния, а не в начале.

Вторая фаза продолжается от начала появления первых струек поверхностного стока до момента подхода струй к рассматриваемому створу. Это начало поверхностного стока — фаза подъема с продолжительностью t_2 . В этот период продолжается поглощение воды почвой.

Третья фаза (продолжительностью t_3) представляет собой явление полного стока при стекании дождевой воды со всей

Неравномерное залегание снега обуславливает изменение во времени площади снеготаяния. Сначала снег тает на открытых местах или на южных склонах возвышенностей, затем скопившийся в глубоких понижениях рельефа и, наконец, в зарослях кустарников и леса.

Коэффициент стока от снеготаяния обычно больше коэффициента стока от дождей. Однако в южных районах иногда весь снег стаивает, не давая стока. Это может быть при затяжном снеготаянии, при малых запасах снега и на слабо промерзших грунтах.

Таким образом, при выпадении дождей или таянии снега в формировании поверхностного стока принимает участие только некоторая часть атмосферных вод. Эти осадки (дождевые или снеговые) называются эффективными или стокообразующими. Суммарная величина потерь атмосферных вод при их стекании по поверхности бассейна может быть выражена коэффициентом стока η или в виде слоя потерь a_n , мм:

$$\eta = \frac{h}{x}; \quad a_n = x - h, \quad (142)$$

где η — коэффициент стока;

x — высота слоя выпавших осадков;

h — высота слоя стока.

Выражение (142) можно записать так:

$$\frac{a_n}{x} = 1 - \frac{h}{x} = 1 - \eta. \quad (143)$$

Добегание. Атмосферные воды по поверхности бассейна стекают в виде мельчайших извилистых ручейков. По этим ручейкам вода течет по склону в пониженные части рельефа — лощины, ложбины, логи, а затем в более крупные притоки — ручьи и малые реки. Процесс добегания играет существенную роль в формировании поверхностного стока. Здесь происходит сложение у замыкающего створа частных расходов воды с различных частей бассейна. Добегание бывает: склоновое (поперечное) — по склонам первичной гидрографической сети и русловое (продольное) — по этой гидрографической сети.

Склоны в бассейне являются площадями первичного формирования стока; здесь нет определенных установившихся путей стока. При различных условиях орошения атмосферные воды стекают к ближайшему постоянному элементу гидрографической сети по разным путям, которые могут менять свое положение.

Длина путей склонового добегания небольшая, чаще не превышает сотен метров. Длина руслового добегания выражается сотнями и тысячами километров.

К мельчайшей гидрографической сети тяготеет около 85—95% всей площади бассейна; только 5—15% площади бассейна примыкает непосредственно к более крупной гидрографической сети — главной реке с ее притоками. Поэтому скорости добегания в первые моменты после начала стекания определяются главным образом скоростями перемещения воды в мельчайшей гидрографической сети (в лощинах, ложби-

нах и логах). Эта сеть выполняет роль собирателя склонового стока. Из мельчайшей сети сток попадает в более крупную сеть, значительно увеличивая расходы в ней.

После прекращения дождя или таяния снега стекание по поверхности бассейна — склоновое добегание — заканчивается в относительно короткий срок. Затем постепенно (тоже в короткие сроки) заканчивается добегание по мельчайшей гидрографической сети — ложинам, ложбинам и логам. Таким образом, мельчайшая гидрографическая сеть является рабочей частью всей гидрографической сети только в период собирания склонового стока.

Схема добегания воды на речных бассейнах изображается с помощью линий одновременного добегания, называемых изохронами (рис. 26, а). Изохроны делят весь бассейн на ряд площадок. Время, за которое частица воды, выпавшая в некоторой части бассейна, добежит до рассматриваемого замыкающего створа, называется временем добегания. Любая частица воды, находящаяся на площади, ограниченной первой изохроной, имеет одинаковое время добегания. Частица воды, находя-

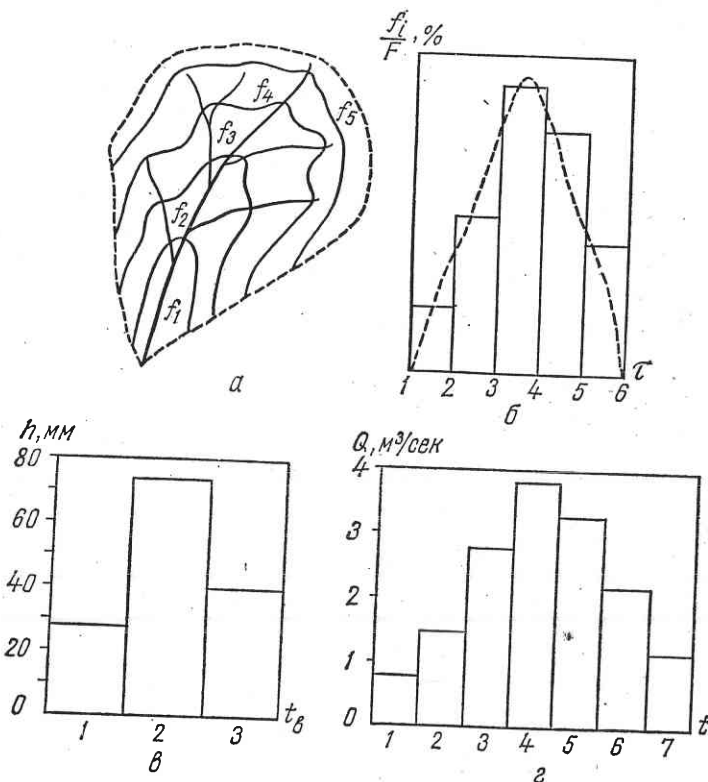


Рис. 26. Схема изохрон стока (а), график распределения частных площадей (б), график водоотдачи (в) и гидрограф стока (г).

щаяся в любой точке площади, ограниченной второй изохроной, имеет уже другое время добегания и т. д.

Положение изохрон не может быть постоянным: по мере изменения скоростей добегания изохроны должны менять свое положение. Для начального периода стекания изохроны следовало бы строить по скоростям добегания для мельчайшей временной гидрографической сети, собирающей основную часть стока для этого периода со склонов, далее по скоростям добегания на более крупных звеньях гидрографической сети и т. д. Кроме того, в каждый момент на различных звеньях приточной системы наблюдаются различные фазы стока: подъем, максимум, спад или полное прекращение стока. Поэтому изохроны можно представить только как изолинии, отвечающие каким-то осредненным значениям скоростей добегания.

§ 2. Основные закономерности в процессах поверхностного стока. Метод изохрон

График распределения площадей одновременного стекания. Гидромеханический анализ процесса поверхностного стока, отражающий механизм добегания поступающей на поверхность водосбора воды до замыкающего створа, проводят с помощью метода изохрон стока. Метод изохрон впервые был предложен Н. Е. Долговым. Затем разрабатывался М. М. Протодяконовым, А. Н. Костяковым и подробно (в виде теории изохрон стока) М. А. Великановым. В дальнейшем теория изохрон применялась в работах А. Н. Бефани, К. П. Воскресенского, С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля, А. В. Огиевского, Д. Л. Соколовского и др.

Допустим, имеется план речного бассейна с изохронами стока, проведенными через равные промежутки времени τ (рис. 26, а). Площади бассейна, заключенные между изохронами $f_1, f_2, \dots, f_n$, называются частными площадями одновременного стекания. С ближайшей частной площади f_1 стекающая вода (дождевая или от таяния снега) достигает замыкающего створа N через время τ ; с площади f_2 — через 2τ , f_3 — через 3τ и т. д.

Определив планиметром площади между изохронами стока и выразив их в долях от общей площади водосбора $\frac{f_1}{F}, \frac{f_2}{F}, \frac{f_3}{F}, \dots, \frac{f_n}{F}$, можно построить график распределения во времени частотных площадей одновременного стекания $\frac{f_i}{F} = f(\tau)$ (рис. 26, б).

Период времени добегания с самой отдаленной точки бассейна до замыкающего створа называют бассейновым или суммарным временем добегания ($\tau_{\max}$).

Формирование гидрографов. Сделаем два допущения. Первое: поступление воды в результате снеготаяния или дождя происходит одновременно по всей площади бассейна и в каждую принятую единицу времени (сутки, час и т. д.) в пределах всей площади с одинаковой интенсивностью. Если, например, в первую единицу времени поступает

количество воды, равное x_i , то эта величина наблюдается на всей площади водосбора; если в какую-нибудь другую, произвольно выбранную единицу времени поступает другое количество x'_i , то его также принимают одинаковым для всей площади водосбора.

Второе допущение — скорости стекания воды остаются неизменными во времени, следовательно, и изохроны стока принимаем неизменными во времени.

Пусть $h_1, h_2 \dots h_i$ — слои воды, стекающей с бассейна в результате выпадения дождя или снеготаяния в принятые интервалы времени, то есть стокообразующая часть осадков или снеготаяния, в дальнейшем называемая водоотдачей. Водоотдача в любой интервал времени равна:

$$h_i = x_i - a_n = x_i \eta, \quad (144)$$

где x_i — слой воды от осадков или снеготаяния, мм;

a_n — слой потерь на инфильтрацию и аккумуляцию (задержание) в понижениях рельефа;

η — коэффициент стока от слоя осадков x_i .

Рассмотрим, как будут формироваться расходы в замыкающем створе N . Предположим, что продолжительность подачи воды на водосбор равна трем суткам (расчетные интервалы можно брать в любых единицах времени: сутках, часах, минутах и т. д.) График водоотдачи и график частных площадей даны на рисунках 26, а и 26, б. Время добегания от наиболее удаленной точки водосбора до замыкающего створа примем равным $\tau_{\max} = 5$ суткам. Тогда спустя сутки после начала водоотдачи к замыкающему створу стечет вода с первой частной площади f_1 , причем величина стока:

$$Q_1 = h_1 f_1. \quad (145)$$

По истечении двух суток добежит до створа сток со второй частной площади f_2 при величине слоя водоотдачи, которая была еще в первом интервале времени, то есть с площади f_2 стечет количество воды, равное $h_1 f_2$. Одновременно через створ будет проходить сток с первой частной площади f_1 при слое водоотдачи, соответствующей второму интервалу времени (вторым суткам). Таким образом, к концу вторых суток расход в замыкающем створе составит:

$$Q_2 = h_1 f_2 + h_2 f_1. \quad (146)$$

К концу третьего интервала времени сток будет происходить уже с трех частных площадей f_1, f_2 и f_3 , и расход в замыкающем створе достигнет:

$$Q_3 = h_1 f_3 + h_2 f_2 + h_3 f_1. \quad (147)$$

По истечении трех суток подача воды в бассейн прекратится, так как мы приняли $\tau_b = 3$ суткам. Поэтому к концу четвертого интервала времени сток будет происходить с частных площадей f_4, f_3 и f_2 , и его величина в замыкающем створе составит:

$$Q_4 = h_1 f_4 + h_2 f_3 + h_3 f_2. \quad (148)$$

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

$$Q_5 = h_1 f_5 + h_2 f_4 + h_3 f_3; \quad (149)$$

$$Q_6 = h_2 f_5 + h_3 f_4; \quad (150)$$

$$Q_7 = h_3 f_5. \quad (151)$$

Таким образом, общая продолжительность стока в данном примере получилась 7 суток; наибольшее количество частных площадей, участвующих в формировании расходов, оказалось равным трем, то есть времени водоотдачи.

В общем виде выражение расхода для любого интервала времени можно записать так:

$$Q_i = h_1 f_i + h_2 f_{i-1} + h_3 f_{i-2} + \dots + h_i f_1 = \sum_{n=1}^{n=i} h_n f_{i-n+1} = \sum_{n=1}^{n=i} h_{i-n+1} f_n. \quad (152)$$

Зависимость (152), выражающая закономерность стока воды с водосбора к замыкающему створу, называется генетической формулой стока.

На основании определенных по формулам (145)–(151) величин расходов $Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_7$ можно построить график стока в замыкающем створе (рис. 26, в).

В рассмотренном примере предполагали, что период водоотдачи (подачи воды на водосбор) $\tau_b = 3$ суткам, а время добегания от наиболее удаленной точки $\tau_{\max} = 5$ суткам. Соответственно получили число интервалов на графике частных площадей, $\tau_{\max} = 5$, а на графике водоотдачи число интервалов $\tau_b = 3$. Общая же продолжительность стекания оказалась равной $5+3-1=7$ суткам.

В общем случае продолжительность стекания равна:

$$T = \tau_{\max} + \tau_b - 1. \quad (153)$$

При формировании гидрографов стока возможны два основных случая:

$$\tau_{\max} > \tau_b \quad \text{и} \quad \tau_{\max} \leq \tau_b.$$

В первом случае, как это было в нашем примере, наибольшее число слагаемых в выражениях для Q (формулы 145–151 или 152) равно времени водоотдачи τ_b , то есть в формировании максимального расхода примет участие только часть водосбора, соответствующая времени водоотдачи и равная наибольшей из площадей, ограниченных смежными изохронами. Таким образом, когда $\tau_{\max} > \tau_b$ в образовании максимума участвует весь слой водоотдачи.

Обозначая время наступления максимального расхода через t (принимая $i=t$ в формуле 151), можно написать, что для случая $\tau_{\max} > \tau_b$ максимальный расход равен:

$$Q_{\max} = \sum_{n=1}^{n=\tau_b} h_n f_{t-n+1}. \quad (154)$$

Во втором случае, когда время максимального добега меньше времени водоотдачи ($\tau_{\text{макс}} \leq \tau_{\text{в}}$), в формировании максимума участвует вся площадь водосбора, но не все части слоя водоотдачи, а лишь те, которые имеют место в период наибольшей интенсивности за время добега.

Аналитически величина максимального расхода для данного случая определится выражением:

$$Q_{\text{макс}} = \sum_{n=1}^{n=\tau_{\text{макс}}} h_{t-n+1} f_n \quad (155)$$

Схема изохрон, кроме указанных ранее допущений, не учитывает и естественного регулирования стока в русле реки.

Русловое регулирование состоит в том, что часть воды, поступающей в русло поверхностным стоком, в период подъема уровней затрачивается на заполнение русла; в период спада уровней задержанный объем стекает. Это приводит к некоторым расхождениям в форме гидрографа стока, вычисленного по изохронам и фактического. Расхождения особенно заметны на концевых участках гидрографа. При фазе подъема ординаты гидрографа в результате естественного руслового регулирования получаются меньше теоретических ординат, полученных по изохронам. При фазе спада наблюдается обратная картина: ординаты фактического гидрографа несколько увеличиваются.

Следствием руслового регулирования является запаздывание фактического стока по сравнению с теоретической продолжительностью его по формуле (153). Фактическая продолжительность стока равна:

$$T_{\Phi} = \tau_{\text{макс}} + \tau_{\text{в}} - 1 + \lambda_p \quad (156)$$

где λ_p — продолжительность опорожнения русловой сети.

Вследствие руслового регулирования стока происходит уменьшение максимального расхода, и наступление его несколько сдвигается вправо по сравнению с теоретическим гидрографом.

Чем больше речной бассейн и чем больше регулирующая емкость его речной сети, тем более существенно отличается гидрограф стока, построенный по изохронам, от фактического гидрографа.

Глава VI. МАКСИМАЛЬНЫЙ И МИНИМАЛЬНЫЙ СТОК

§ 1. Факторы весеннего половодья

Половодье — это фаза водного режима реки, характеризующаяся продолжительным повышением стока, который повторяется ежегодно в одни и те же сезоны.

Половодье вызывается на равнинных реках снеготаянием (весеннее половодье), на высокогорных — таянием снега и ледников (летнее половодье), в муссонных и тропических зонах — выпадением летних, затяжных дождей (например, летнее половодье на реках Дальнего Востока за счет муссонных дождей).

Кратковременные повышения стока, не приуроченные к определенному периоду года и повторяющиеся в некоторые годы по нескольку раз, называются паводками. Паводки обычно возникают от дождей, но в условиях неустойчивой зимы паводки могут быть обусловлены интенсивным кратковременным снеготаянием. Встречаются также смешанные снего-дождевые половодья и паводки.

Весеннее половодье типично для большинства рек СССР. К основным факторам стока весеннего половодья относятся запасы воды в снежном покрове, интенсивность и продолжительность снеготаяния. Кроме того, на весеннее половодье оказывают влияние величина и форма бассейна, рельеф, характер почв, геологическое строение бассейна, наличие в бассейне озер, лесов, болот. Все эти факторы в той или иной мере вызывают аккумуляцию и регулирование образовавшихся из снега талых вод.

Интенсивность снеготаяния. За интенсивность снеготаяния, которая зависит от солнечной радиации и температуры воздуха, принимают количество талых вод, образующихся в единицу времени.

Для отдельных частей водосбора на интенсивность снеготаяния влияет экспозиция склонов. Увеличение интенсивности снеготаяния сокращает его продолжительность и увеличивает пик половодья.

Продолжительность снеготаяния колеблется в значительных пределах. Так, для равнинных рек европейской части СССР (сравнительно больших бассейнов) продолжительность половодья изменяется от 10 суток на юге до 40 суток на севере.

На больших бассейнах снег начинает таять, как правило, неодновременно, что влияет на процессы формирования половодья.

Снег начинает таять задолго до начала стока. В течение некоторого времени, составляющего около одной трети всего периода снеготаяния, талая вода лишь увлажняет толщу снежного покрова. Водоотдача из снега, следовательно, и сток начинаются после насыщения снега водой до максимальной влагоемкости. Максимальная влагоемкость снега зависит от его структуры и колеблется от 15 до 50% (в среднем около 30%).

Таким образом, снежный покров является аккумулятором талой воды, задерживающим водоотдачу. Значительное увеличение водоотдачи происходит под влиянием весенних дождей. Дожди уменьшают аккумуляционную способность снега, изменяя его структуру; дождями разрушаются снежные капилляры, вследствие чего содержащаяся в снеге капиллярная и пленочная вода переходит в гравитационную, быстро стекающую вниз.

Часть поступающей на речной бассейн воды, которая не участвует в формировании стока, представляет потери стока половодья. К таким потерям относятся испарение с поверхности талых вод и снега, инфильтрация и аккумуляция (задержание) вод на поверхности бассейна.

Испарение. В период снеготаяния часть талых вод теряется на испарение. Одновременно происходит также испарение с поверхности снега. Однако величина потерь на испарение небольшая, не превышаю-

щая 10% от запасов воды в снеге. Особенно малы потери на испарение в северных районах.

Инфильтрация. Часть талых вод расходуется на просачивание (инфильтрацию) в почву.

Величина инфильтрации зависит от структуры почвогрунтов, степени промерзания почв и увлажнения почвы перед наступлением отрицательных температур воздуха. Часть просочившихся талых вод остается в почве, насыщая ее до полной влагоемкости.

Другая часть талых вод, просочившись через верхний легководопроницаемый слой почвы, достигает верхнего, менее водопроницаемого слоя и стекает по поверхности этого относительного водоупора. Это так называемый **внутрипочвенный сток**. Обычно водоупором, по которому стекают талые воды, является мерзлый слой, который по мере оттаивания почвы продвигается вниз. Если нет другого относительного водоупора, внутрипочвенный сток в оттаявшей почве прекращается, так как становится возможным просачивание воды в нижние слои.

На песчаных и лесных подзолистых почвах водосборов со сравнительно высоким положением первого относительного водоупора величина внутрипочвенного стока составляет значительную долю весеннего стока. Эта часть просочившейся воды представляет собой временную аккумуляцию, несколько выравнивающую половодный сток; продолжительность половодья растягивается, а наибольшая ордината гидрографа половодья (максимальный расход) несколько снижается.

И, наконец, третья часть просочившихся талых вод достигает зеркала грунтовых вод, пополняя их запасы и обеспечивая питание реки в межень. Эту часть стока, переходящую на межень, исключают из весеннего стока и рассматривают как его потери.

Особенно значительной величины достигают потери на инфильтрацию для степной зоны при низком стоянии уровня грунтовых вод.

Минимальные потери талых вод на инфильтрацию и наибольшее значение поверхностного весеннего стока наблюдаются, если земля покрыта ледяной коркой. Установлено, что образованию значительных весенних половодий, которые и являются расчетными, обычно предшествуют суровые зимы с сильным промерзанием почв.

Аккумуляция на поверхности бассейна. С начала водоотдачи талые воды не сразу стекают по склону, а заполняют неровности рельефа на водосборе. Чем больше площадь водосбора, тем больше его аккумулярующая способность, тем больше его сглаживающее влияние на половодный сток.

Трансформирование (сглаживание) половодного стока с увеличением площади бассейна объясняется также различным временем добегания воды по отдельным составляющим гидрографической сети, увеличением руслового регулирования. Поэтому с увеличением площади водосбора максимальный модуль стока уменьшается, продолжительность половодья увеличивается, форма гидрографа становится более плавной, растянутой.

Наиболее сильно выражены процессы аккумуляции стока в бассейнах, имеющих значительные аккумулярующие емкости в виде озер. Озера задерживают часть талых вод, вследствие чего величина максимального расхода весеннего половодья снижается.

Регулирующее влияние озер зависит от их расположения на водосборе и может существенно изменяться в зависимости от состояния их обводнения. После ряда засушливых, маловодных лет, когда озера не наполнены, аккумулярующая способность их значительно больше; после многоводных лет — меньше.

Пруды и водохранилища оказывают такое же влияние на сток половодья, как и озера.

Аккумуляция талых вод происходит и при наличии лесного покрова.

Снижение максимума весеннего половодья в лесных бассейнах зависит от залесенности, расположения лесов в бассейне, состава лесных насаждений.

Регулирующая роль болот сравнительно невелика и зависит от типа, размеров и размещения болот по водосбору.

Влияние озерности, лесистости и заболоченности водосборов на снижение максимальных расходов половодий выражено эмпирическими зависимостями, которые приведены ниже (при вычислении расчетных максимальных расходов воды).

Аккумулярующей способностью талых вод обладают также мощные толщи рыхлых отложений (крупнозернистых песков, песчано-гравелистых грунтов), трещиноватые и карстовые породы. Наличие их в бассейне приводит к значительному снижению максимума весеннего половодья.

§ 2. Факторы ливневого стока

К основным факторам формирования ливневого стока относятся: 1) интенсивность ливня, его продолжительность и площадь, охватываемая ливнем; 2) инфильтрация воды в почву и 3) добегание ливневых вод по русловой сети бассейна.

Интенсивность ливня. Главное значение в формировании максимальных расходов на малых водосборах (когда время добегания $\tau_{\text{макс}}$ меньше продолжительности водоотдачи $\tau_{\text{в}}$) имеет максимальная интенсивность водоотдачи, а в формировании максимальных расходов на больших водосборах ($\tau_{\text{макс}} > \tau_{\text{в}}$) — слой стока за паводок.

В соответствии с этим при исследовании ливневого стока важен расчет интенсивности ливней и слоя дождевых осадков.

Ливни отличаются резким уменьшением интенсивности с увеличением их продолжительности. Эта зависимость выражена уравнением:

$$i = \frac{S}{(t+1)^n}, \quad (157)$$

где i — средняя интенсивность ливня;
 t — продолжительность ливня, мин;

n — показатель редукции интенсивности ливня по продолжительности (значение показателя степени n , вычисленное З. П. Богомазовой и З. П. Петровой (ГГИ), в среднем равно 0,67);
 $\dot{S}$ — предельная, или мгновенная, интенсивность ливня;

$$S = i_{\text{макс}} \text{ при } t \rightarrow 0.$$

З. П. Богомазовой и З. П. Петровой получена следующая зависимость предельной интенсивности ливней S от их повторяемости:

$$S = A + B \lg N, \quad (158)$$

где A и B — геоморфологические параметры;

N — число лет превышения ливней данной интенсивности, или расчетная повторяемость ливней в годах.

Таким образом, для любого пункта территории СССР интенсивность ливня в зависимости от принятой расчетной продолжительности может быть вычислена по формуле:

$$i = \frac{A + B \lg N}{(1 + t)^{0,67}}. \quad (159)$$

Параметры A и B определяются по таблице, составленной З. П. Богомазовой и З. П. Петровой, или по картам изолиний этих параметров.

Из формулы (159) следует, что количество осадков за ливень продолжительностью t мин равно:

$$H_t = it = \frac{A + B \lg N}{(1 + t)^{0,67}} t \approx (A + B \lg N) t^{0,33}. \quad (160)$$

Этой формулой можно пользоваться при расчетах максимальных расходов с временем добегания не больше 8—10 ч. При больших продолжительностях времени добегания получается существенное преувеличение расчетного слоя осадков за дождь и как следствие преувеличение величин максимальных расходов.

Следует иметь в виду, что большие водосборы не покрываются полностью одновременно дождями, что приводит к уменьшению среднего слоя осадков на таких водосборах по сравнению с малыми.

Слой осадков заданной повторяемости можно определить также путем построения кривой обеспеченности суммарных количеств осадков за отдельные дожди в году. Учитывая, что кривые обеспеченности слоя отличаются большой асимметричностью и потому не всегда достаточно точно описываются принятыми в гидрологии кривыми распределения, Г. А. Алексеев предложил для дождевых осадков особую кривую распределения, отвечающую уравнению:

$$H = a (\lg \bar{m} + \lg N)^{1,82}, \quad (161)$$

где H — слой осадков за сутки в миллиметрах, повторяемостью 1 раз в N лет;

$\bar{m}$ — среднее число дней с осадками за теплый период года;

a — параметр, пропорциональный среднему суточному количеству осадков:

$$a = k \frac{\bar{w}}{\bar{m}}. \quad (162)$$

Здесь k — коэффициент, изменяющийся от 2,57 до 2,68 (в среднем $k = 2,62$); $\bar{w}$ — средняя сумма (норма) осадков за теплый сезон.

Параметры кривой обеспеченности $\bar{w}$ и $\bar{m}$ определяют по «Климатологическому справочнику» или по данным наблюдений отдельных метеорологических станций.

Инфильтрация воды в почву. Вторым важным и наиболее трудным для расчетов фактором формирования ливневого стока является инфильтрация воды в почву.

Потери дождевых осадков на инфильтрацию существенно превышают аналогичные потери при снеготаянии, доходя до 70—80% от слоя осадков, что соответствует коэффициенту стока 0,20—0,30, в то время как коэффициент стока снеговых половодий превышает величину 0,30—0,50 и часто приближается к единице. Это объясняется разной степенью увлажнения почвы при снеговых и дождевых паводках.

Так же как и для снегового половодья, потерями дождевого стока является не весь слой инфильтрации, а лишь та его часть, которая уходит в глубокие водоносные слои и затрачивается на увлажнение почвогрунтов. Остальная его часть, образующая при песчаных и крупнозернистых грунтах водосбора внутриводосборный сток, принимает участие в формировании паводка.

В связи с затруднениями практического определения потерь на инфильтрацию в течение всего хода паводка учет этих потерь производится или путем вычитания слоя потерь из слоя осадков, или путем умножения слоя осадков на коэффициент стока.

В первом случае считают, что интенсивность инфильтрации во времени не меняется, поэтому величина эффективных (стокообразующих) осадков и, следовательно, величина стока в каждый момент времени зависят от соотношения интенсивности осадков и принятой средней интенсивности инфильтрации.

Г. А. Алексеев на основании шкалы инфильтрации, разработанной М. Ф. Срибным, вычислил слой начальных потерь для различных типов поверхностей в различных климатических районах.

Вычитая из слоя осадков за дождь слой начальных потерь, можно определить слой эффективных осадков или слой стока. В действительности инфильтрация осадков продолжается в течение всего периода стока, но эти потери невелики по сравнению с начальным слоем потерь. Потерями на испарение за краткостью периода продолжительности ливня пренебрегают.

Во втором способе учета потерь на инфильтрацию — с помощью коэффициента стока — считают, что всегда теряется некоторая часть осадков, что осадки стекают даже тогда, когда их интенсивность меньше интенсивности инфильтрации, то есть если они полностью расходуются на впитывание.

Таким образом, каждый из приведенных способов учета потерь имеет свои недостатки. Правильно учитывать потери можно только при наличии кривой инфильтрации. Д. Л. Соколовским, К. П. Воскресенским и другими вычислены приближенные значения коэффициентов стока дождевых паводков различной обеспеченности в различных физико-географических районах СССР.

Фактор добегания. Третий важнейший фактор, влияющий на формирование ливневых паводков, — добегание ливневых вод до русловой сети бассейна.

В связи с тем что в начальный период выпадения дождя все осадки идут на покрытие начальных потерь, а в конце, когда интенсивность осадков становится меньше размера установившейся инфильтрации, они полностью тратятся на инфильтрацию, продолжительность стокообразующей части дождя (водоотдачи) значительно меньше всей продолжительности дождя.

Таким образом, продолжительность поступления воды в русловую сеть при ливневом паводке значительно меньше, чем при снеговом половодье. Поэтому влияние фактора добегания при ливневом паводке сказывается значительно сильнее и редукция по площади водосбора больше, то есть с увеличением площади водосбора наблюдается резкое уменьшение максимального модуля.

Схема добегания и суммирования вод с частных площадей бассейна к замыкающему створу, а также аналитическое выражение этой схемы при помощи генетической формулы стока рассмотрены выше.

На формирование ливневых паводков оказывают влияние также физико-географические факторы, рассмотренные при анализе весеннего половодья (озерность, заболоченность, рельеф, почвенно-геологические условия и др.). Влияние их на параметры дождевых паводков носит в общем такой же характер, но с некоторыми особенностями, определяющимися более кратковременной водоотдачей и отсутствием промерзания и предварительного увлажнения почвогрунтов.

§ 3. Определение максимальных расходов воды при наличии данных наблюдений

Расчетным максимальным расходом называется расход, на пропуск которого рассчитываются отверстия гидротехнических сооружений. Величиной максимальных расходов определяются размеры плотин, водосбросных сооружений, отверстия железнодорожных мостов и мостов на шоссейных дорогах, труб и т. д. Прохождение максимальных расходов нередко связано с разрушением гидротехнических сооружений, если величина максимума и его повторяемость определены неправильно. С другой стороны, преувеличение расчетного максимума излишне удорожает стоимость сооружений.

В настоящее время максимальные расчетные расходы по многолетним наблюдениям находят в соответствии со «Строительными нормами и правилами», часть II, раздел I, глава 7» (СНиП II-И. 7—65), которые введены в действие с 1 января 1966 года.

В нормах указана расчетная ежегодная вероятность превышения (расчетная обеспеченность) максимальных расходов воды в зависимости от класса капитальности сооружений (табл 4).

ТАБЛИЦА 4

Класс капитальности сооружений	Расчетная обеспеченность $p, \%$	Класс капитальности сооружений	Расчетная обеспеченность $p, \%$
I	0,01	IV	1
II	0,1	V	10
III	0,5		

Класс капитальности сооружений устанавливается в соответствии с указаниями СНиП II-И. 1—62 «Гидротехнические сооружения речные» и СНиП II-И. 3—62 «Сооружения мелиоративных систем». Все гидротехнические сооружения разбиты по капитальности на пять классов.

К I классу капитальности относятся наиболее ответственные сооружения, которые рассчитываются на максимальный расход наименьшей расчетной обеспеченности ($p=0,01\%$). К V классу относятся временные сооружения, наименее ответственные, поэтому и расчетная обеспеченность для проектирования таких сооружений имеет наибольшее значение ($p=10\%$).

При проектировании постоянных сооружений, разрушение которых может вызвать катастрофические наводнения, нормами допускается уменьшение расчетной обеспеченности максимального расхода до $0,01\%$ по сравнению с данными таблицы 4.

Максимальные расходы по своему происхождению делят на три группы:

- снеговые максимумы или максимумы талых вод;
- ливневые или дождевые максимумы;
- смешанные максимумы, то есть максимумы, образующиеся от совместного действия снеготаяния и дождей.

При расчете гидротехнических сооружений прежде всего необходимо установить, максимум какого происхождения на данном водотоке является расчетным, то есть наиболее высоким, — снегового, дождевого или смешанного.

При наличии устойчивого снежного покрова максимум весеннего половодья (снеговой максимум) обычно бывает больше дождевого максимума.

В лесостепной и степной зонах ливневые максимумы превышают снеговые на малых водосборах, но меньше снеговых на средних и больших водосборах. В лесной зоне ливневые максимумы могут превышать снеговые только для самых малых водосборов.

В некоторых климатических районах Советского Союза (Дальний Восток, северо-восток Сибири, Прибайкалье) обложные дожди форми-

руют максимальные расходы, превышающие снеговые не только на малых, но и на средних и больших реках. В этих условиях дождевые паводки носят характер половодья.

На малых реках весенние и особенно дождевые паводки проходят обычно очень быстро. Непродолжительным бывает стояние ливневых максимумов и на более крупных реках. Поэтому среднесуточные максимумы существенно отличаются от мгновенных наибольших расходов. В связи с этим в расчет вводят не среднесуточные расходы, а мгновенные, или срочные, максимальные расходы воды (расходы, отвечающие наблюдениям в определенные сроки). Если паводок кратковременный и проходит между сроками гидрометрических измерений, устанавливают соотношение между зарегистрированными и действительными максимумами и вводят соответствующие поправки в расчеты максимальных расходов воды.

Расчет максимальных расходов воды отличается от анализа других гидрологических явлений некоторыми особенностями. В этом расчете представляют интерес наиболее высокие расходы воды, крайне редко повторяющиеся и поэтому слабо или совсем не представленные в материалах наблюдений. Вследствие недостаточно продолжительных периодов наблюдений над стоком расходы редкой повторяемости рассчитывают на основе методов математической статистики.

При отсутствии данных наблюдений расчет максимальных расходов ведут одним из существующих методов, базирующихся на изучении условий формирования половодий и паводков.

Расчет максимальных расходов талых и ливневых вод. При наличии гидрометрических данных по максимальному стоку за достаточно длительный период наблюдений расчетные максимальные расходы талых (снеговых) и ливневых вод определяют по теоретической кривой обеспеченности, построенной по этим наблюдениям. При этом необходимо руководствоваться требованиями СНиП II-И. 7—65.

Статистической обработке данных по максимальному стоку предшествует тщательная проверка и анализ исходных наблюдений. Особое внимание следует уделять анализу правильности построения и экстраполяции кривой расходов $Q=f(H)$, от которой зависит принятая величина наиболее высоких расходов.

Детальной проверке нужно подвергать так называемый исторический максимум, то есть наибольший максимальный расход за продолжительный период времени. Величину исторического максимума определяют по меткам высоких вод, устанавливаемых в процессе гидрологических изысканий. В процессе изысканий получают также поперечные профили русла и поймы и показатели их шероховатости. По поперечным профилям вычисляют площади живого сечения русла, правой и левой пойм до зафиксированного высокого уровня. Принимая расчетный уклон, равный среднему уклону коренного русла, определяют значение максимального расхода по формуле равномерного движения. Вычисления ведут отдельно для русла и поймы, так как их шероховатость различна. Общий расход получается как сумма трех расходов: коренного русла, правой и левой пойм.

Полученный таким образом максимум проверяют путем сопоставления его с величинами максимального стока на других створах той же реки или на реках-аналогах того же района, путем сопоставления со снеготаянием, интенсивностью нарастания температур для снегового половодья или с дождевыми осадками на ближайших метеорологических станциях.

Для построения теоретической кривой обеспеченности максимальных расходов вычисляют ее параметры:

1) средний многолетний максимальный расход

$$\bar{Q}_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n};$$

2) коэффициент вариации

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K-1)^2}{n-1}},$$

где

$$K = \frac{Q_i}{\bar{Q}_{\max}};$$

3) коэффициент асимметрии C_s . В соответствии с требованиями СНиП II-И. 7—65 коэффициент асимметрии принимают:

для талых вод равнинных рек $C_s = 2C_v$;

для дождевых и смешанных расходов равнинных рек $C_s = (3 \div 4)C_v$;

для дождевых и смешанных расходов горных рек $C_s = 4C_v$.

Окончательно выбирают значения параметра C_s в результате сопоставления теоретической кривой обеспеченности с фактическими данными наблюдений.

Нормами допускается также применение других методов определения параметров кривой обеспеченности, в частности метода наибольшего правдоподобия (см. главу III).

При наличии данных об историческом максимуме параметры кривой обеспеченности определяют с его учетом по следующим формулам:

$$\bar{Q}'_{\max} = \frac{1}{N} \left[Q_N + \frac{N-1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \right]; \quad (163)$$

$$C'_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[\left(\frac{Q_N}{\bar{Q}'_{\max}} - 1 \right)^2 + \frac{N-1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{\bar{Q}'_{\max}} - 1 \right)^2 \right]}, \quad (164)$$

где Q_N — величина исторического максимума;

n — период непрерывных наблюдений;

N — период, в течение которого наблюденный Q_N является наибольшим.

По найденным параметрам $\bar{Q}'_{\max}$, C'_v и C_s строят теоретическую кривую обеспеченности, соответствующую трехпараметрическому гамма-

распределению. При надлежащем обосновании допускается применение других типов кривых распределения вероятностей.

Построенную теоретическую кривую обеспеченности максимальных расходов проверяют данными фактических наблюдений по формуле:

$$p = \frac{m}{n+1} 100\%.$$

По кривой обеспеченности определяют величину максимального расчетного расхода:

$$Q_p = K_p \bar{Q}_{\max}, \quad (165)$$

где K_p — ордината кривой обеспеченности.

Значение расчетной обеспеченности принимают в зависимости от класса капитальности сооружения (см. табл. 4).

За критерий достаточной длительности ряда наблюдений принимают условие, что гарантийная поправка ΔQ при коэффициенте $a=1$ не превышает 20% от величины расчетного максимума, то есть

$$\Delta Q \leq 0,2 Q_p. \quad (166)$$

Гарантийная поправка пропорциональна среднеквадратической ошибке вычисленной величины максимального расхода воды и равна:

$$\Delta Q = \frac{a E_p}{\sqrt{n}} Q_p, \quad (167)$$

где Q_p — расчетный максимальный расход;

E_p — относительная среднеквадратическая ошибка ординаты кривой обеспеченности, определяемая по графику (рис. 27) в зависимости от расчетной обеспеченности и коэффициента C_v ;

n — число наблюдений;

a — коэффициент, характеризующий гидрологическую изученность бассейна; $a=0,7$ для рек, расположенных в гидрологически изученных областях; $a=1,5$ для рек, расположенных в гидрологически слабо изученных областях. Для проверки достаточности данных наблюдений принимают $a=1$.

Если условие (166) выполняется, значит данных наблюдений достаточно и максимальный расход, вычисленный по формуле (165), можно принять в качестве расчетного для проектирования сооружений.

Невыполнение условия (166) приводит к необходимости удлинения ряда имеющихся данных наблюдений по максимальному стоку методом гидрологической аналогии. Если удлинение ряда не представляется возможным, следует определять расчетный максимальный расход другими методами.

В соответствии со СНиП II-И. 7—65 при проектировании сооружений I класса капитальности или других сооружений, рассчитываемых на расход обеспеченностью $p=0,01\%$, к расчетному максимальному расходу прибавляют гарантийную поправку ΔQ , то есть исправленный расход:

$$Q_p = Q_p + \Delta Q_p. \quad (168)$$

Расчетный объем стока снегового половодья или дождевого паводка определяют по кривой обеспеченности объемов стока половодий или паводков аналогично определению максимальных расходов.

Определение расчетного максимума смешанного происхождения. При определении максимальных расходов воды, образующихся от совместного действия снеготаяния и дождей (ливней), необходимо исследовать колебания расходов воды каждого вида в отдельности и возможные их сочетания.

Если максимумы каждого из двух типов наблюдаются в разные сезоны и не связаны между собой, то для определения расчетной величины максимального расхода рекомендуется следующий прием.

На основании данных наблюдений строят отдельно кривую обеспеченности максимальных расходов весеннего половодья (рис. 28, а) и кривую обеспеченности летних ливней (рис. 28, б).

Рассмотрим какой-нибудь расход Q , который весной имеет обеспеченность p_1 , а летом p_2 . Будем наблюдать превышение расхода в среднем за время p_1+p_2 . Однако из общего числа случаев, когда какой-либо из максимумов (напри-

мер, весенний) превосходит значение Q , нас интересуют только те случаи, для которых этот весенний расход выше летнего. Поэтому из числа случаев p_1+p_2 нужно вычесть столько случаев, сколько раз наблюдались годы, для которых оба расхода (весенний и летний) выше Q , так как в эти годы один из двух максимумов по нашему условию не подпадает под учет. Считаем, что между величинами Q_v и Q_l для одного и того же года не существует никакой связи, поэтому каждое Q_v может сочетаться с любым значением Q_l . Число случаев, когда $Q_v > Q$ составляет p_1 . Каждый из этих случаев может сочетаться с любым Q_l . Однако нас интересуют только те сочетания, когда $Q_l > Q$, а таких случаев p_2 . Очевидно, что лишь для доли $p_1 \cdot p_2$ общего числа случаев оба расхода будут выше Q . Это произведение и следует вычесть из суммы p_1+p_2 . Тогда абсцисса искомой совместной кривой обеспеченности,

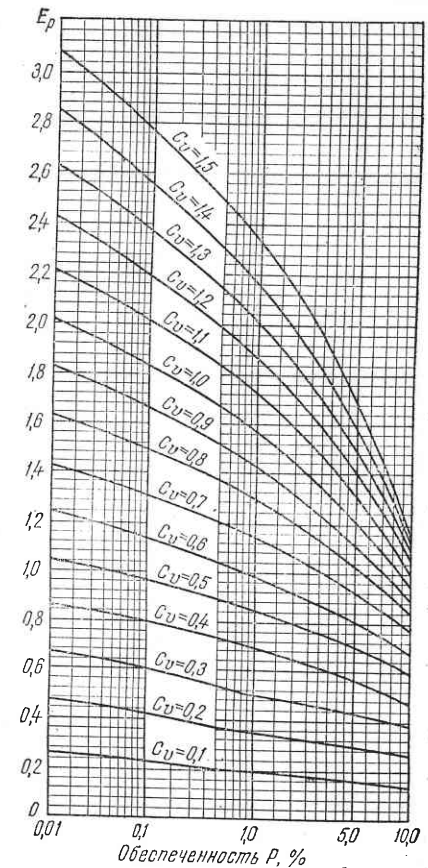


Рис. 27. Номограмма для определения E_p .

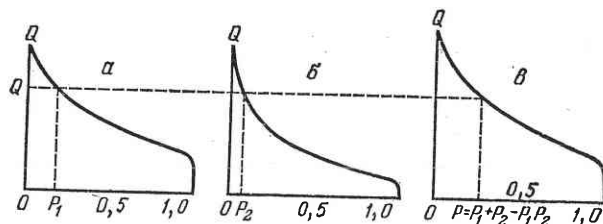


Рис. 28. Построение кривой обеспеченности смешанных расходов:
а — весенних расходов; б — летних; в — совместная кривая обеспеченности.

отвечающая ординате Q , равна:

$$p = p_1 + p_2 - p_1 p_2. \quad (169)$$

Задаваясь различными значениями Q , находим по выражению (169) обеспеченность p и по этим данным строим совместную кривую обеспеченности (рис. 28, в). При построении обеспеченность берут в долях от единицы, то есть $p=100\%$ соответствует единице; тогда $p=50\%$ — половине; $p=25\%$ — четверти и т. д.

Дальнейший ход определения расчетного максимума по совместной кривой аналогичен рассмотренному ранее.

§ 4. Расчет максимального стока половодья при отсутствии или недостаточности гидрометрических данных

Для расчета максимальных расходов талых вод при отсутствии или недостаточности наблюдений предложен ряд эмпирических формул (формулы Д. Л. Соколовского, В. И. Мокляка, Л. Т. Федорова, Г. А. Алексеева, М. Ф. Срибного и др.). Эти формулы разработаны на основании исследований, выполненных 10—25 лет назад при крайне слабой изученности стока малых рек, на которых сеть станций создана лишь в последние годы. Поэтому параметры формул получены по ограниченным материалам, относящимся преимущественно к большим рекам только для территории европейской части СССР. Для расчета максимального стока талых вод азиатской части СССР не было скольких-нибудь обоснованных рекомендаций, опирающихся на современные данные по стоку.

В 1960—1965 гг. коллектив Государственного гидрологического института под руководством доктора географических наук А. А. Соколова провел исследования существующих приемов и методов расчета стока талых вод и разработал расчетную схему, опирающуюся на обобщение многолетней практики гидрологических расчетов, параметры которой обоснованы всей совокупностью современных гидрометрических данных. В результате были составлены первые нормы по расчету максимального весеннего стока для неизученных бассейнов

«Указания по определению расчетных максимальных расходов талых вод при отсутствии или недостаточности гидрометрических наблюдений» (СН 356—66). Они являются дополнением к СНиП II-И. 7—65.

Указания применяют для расчета максимальных расходов талых вод на реках с площадью водосбора $F < 20\,000 \text{ км}^2$ в европейской части Советского Союза и с $F < 50\,000 \text{ км}^2$ в азиатской части СССР. Для больших площадей водосборов максимальные расходы талых вод при отсутствии гидрометрических данных определяют по меткам высоких вод в результате специальных гидрологических исследований.

Применительно к задаче расчета максимальных расходов талых вод все реки Советского Союза делятся на две группы: равнинные и горные. Это вызвано тем, что условия формирования максимальных расходов горных рек существенно отличаются от условий равнинных рек.

Границы районов для расчета по схеме, предназначенной для равнинных или горных рек, показаны на карте (рис. 29). Там же показаны районы, где снеговое половодье выражено слабо и где расчетными являются максимальные расходы дождевых вод.

Расчет максимальных расходов талых вод равнинных рек. Расчетный максимальный расход талых вод на равнинных реках определяют по формуле:

$$Q_p = M_p F = \frac{K_0 h_p F}{(F+1)^n} \delta_1 \delta_2, \quad (170)$$

где M_p — модуль максимального расчетного расхода воды, $\frac{Q_p}{F}$, $\text{м}^3/\text{сек} \cdot \text{км}^2$;

F — площадь водосбора до замыкающего створа, км^2 ;

h_p — расчетный слой стока половодья той же вероятности превышения $p\%$, что и искомый максимальный расход, мм;

K_0 — коэффициент дружности половодья на элементарных (малых) бассейнах (при $F \rightarrow 0$ и $\delta_1 \delta_2 = 1$);

n — показатель степени, характеризующий редукцию (уменьшение) коэффициента дружности половодья в зависимости от площади водосбора;

δ_1 — коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды рек, зарегулированных озерами;

δ_2 — коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды в залесенных и заболоченных бассейнах.

Рассмотрим методику определения параметров, приведенных в формуле (170).

Значение параметров n и K_0 находят в зависимости от природной зоны (района) и категории рельефа по таблице 5.

Если уравнение (170) представить в виде

$$\frac{M_p}{h_p \delta_1 \delta_2} = \frac{K_0}{(F+1)^n}$$

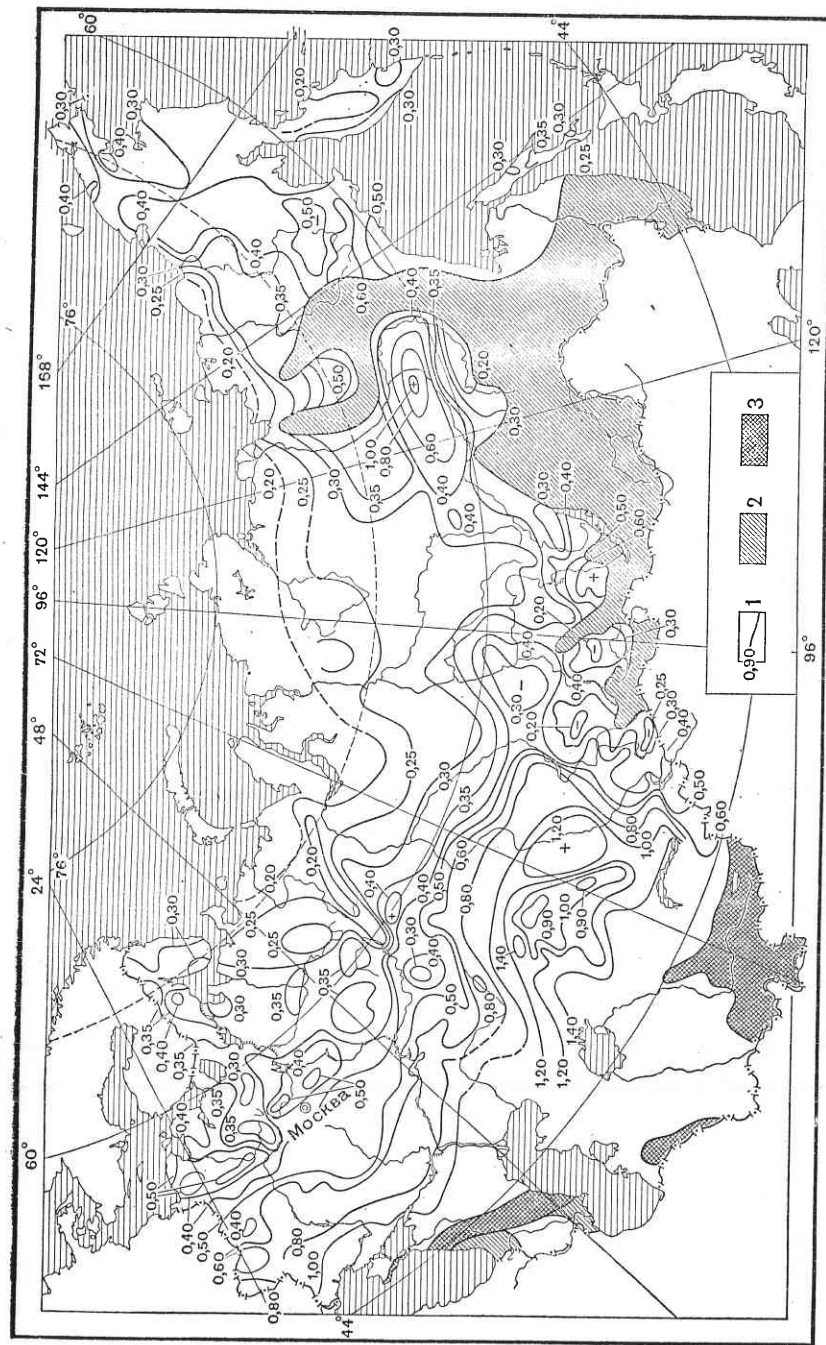


Рис. 29. Карта среднего слоя стока половодья (мм).

1 — районы, где за расчетные приняты максимальные расходы половодья; 2 — районы, где за расчетные приняты максимальные расходы дождевых паводков; 3 — горные районы, в которых весеннее половодье не выделено.

Природная зона	n	K ₀ при категории рельефа		
		первой	второй	третьей
Тундра и лесная зона				
Европейская территория СССР				
Восточная Сибирь	0,17	0,010	0,008	0,006
Западная Сибирь	0,25	—	0,013	0,010*
Лесостепь и степь				
Европейская территория СССР (без Северного Кавказа)	0,25	0,020	0,015	0,012
Северный Кавказ	0,25	0,030	0,025	—
Западная Сибирь	0,25	0,030	0,020	0,015
Засушливые степи и полупустыни				
Западный и Центральный Казахстан	0,35	0,060	0,040	—

* Для сильно заболоченных бассейнов с F более 10 000 км².

и прологарифмировать его, получим:

$$\lg \frac{M_p}{h_p \delta_1 \delta_2} = \lg K_0 - n \lg (F + 1). \quad (171)$$

Если $\delta_1 \delta_2 = 1$, то уравнение примет вид:

$$\lg \frac{M_p}{h_p} = \lg K_0 - n \lg (F + 1). \quad (172)$$

Таким образом, параметр n представляет собой угловой коэффициент уравнений (171) и (172).

При определении параметров n и K₀ обеспеченность слоя стока половодья и модуля стока принимали одинаковой (p=1%), то есть параметр K₀, значения которого приведены в таблице 6, определяли по зависимости:

$$\frac{M_{1\%}}{h_{1\%}} = f(F). \quad (173)$$

Коэффициент дружности половодья K₀ зависит от категории рельефа, которая устанавливается по гипсометрической карте с учетом степени расчлененности рельефа.

К первой категории рельефа относятся реки, большая часть которых располагается в пределах холмистых и платообразных возвышенностей; ко второй — реки, в бассейнах которых холмистые возвышенности чередуются с понижениями между ними; к третьей — реки, большая часть бассейнов которых располагается в пределах плоских низменностей, а также реки, имеющие широкие заболоченные поймы.

Допускается также определять категорию рельефа по соотношению:

$$a = \frac{I_{\Phi}}{I_T}, \quad (174)$$

где I_{ϕ} — средневзвешенный уклон главного водотока;
 I_T — типовой уклон;

$$I_T = \frac{25}{\sqrt{F+1}}.$$

При $a=1$ бассейн относится к первой категории рельефа; при $a=1,0-0,5$ — ко второй и при $a<0,5$ — к третьей категории рельефа.

Определение K_0 в зависимости от категории рельефа учитывает скорости стекания талых вод. Это сближает расчетную редуцированную схему (170) с теоретическими схемами, учитывающими продолжительность добегания, зависящую в основном от рельефа бассейна.

Расчет слоя стока половодья. Слой стока половодья заданной вероятности превышения h_p находят по трем параметрам: среднему многолетнему слою $\bar{h}$, коэффициенту вариации C_{vh} и коэффициенту асимметрии C_{sh} .

Высоту среднего многолетнего слоя половодья $\bar{h}$ для бассейнов с площадью водосбора более 100 км^2 на европейской части и более 1000 км^2 на азиатской части СССР определяют непосредственно по карте изолиний (рис. 29).

Для меньших площадей водосбора в величины $\bar{h}$, снятые с карты, вводят поправки. При благоприятных условиях стока (холмистый рельеф, глинистые почвы) поправочный коэффициент равен 1,1; при менее благоприятных условиях стока (плоский рельеф, песчаные почвы) — поправочный коэффициент равен 0,9. При значительной степени озерности (более 2%) учитывают снижение слоя весеннего стока при помощи поправочного коэффициента, изменяющегося в пределах 0,9—0,7.

Значение коэффициента вариации C_{vh} снимают с карты изолиний этой величины (рис. 30).

Значение коэффициента асимметрии принимают по соотношению $C_{sh}=2C_{vh}$. Для северо-запада и северо-востока СССР, где в формировании стока половодья в значительной мере участвуют дождевые осадки, применяется соотношение $C_{sh}=3C_{vh}$.

По найденным параметрам $\bar{h}$, C_{vh} и C_{sh} определяют расчетный слой весеннего половодья:

$$h_p = K_p \bar{h}, \quad (175)$$

где K_p — ордината кривой обеспеченности, определяемая по приложению 2 для заданной расчетной обеспеченности p .

Расчетную обеспеченность (вероятность превышения) слоя стока половодья принимают такой же, как и максимального расчетного расхода, в зависимости от класса капитальности сооружений (табл. 4).

Регулирующее влияние озер и водохранилищ учитывается коэффициентами δ_1 и δ'_1 . Коэффициент δ_1 , учитывающий снижение максимального стока рек, зарегулированных озерами, определяют по формуле:

$$\delta_1 = \frac{1}{1 + c'_{\text{оз}}}, \quad (176)$$

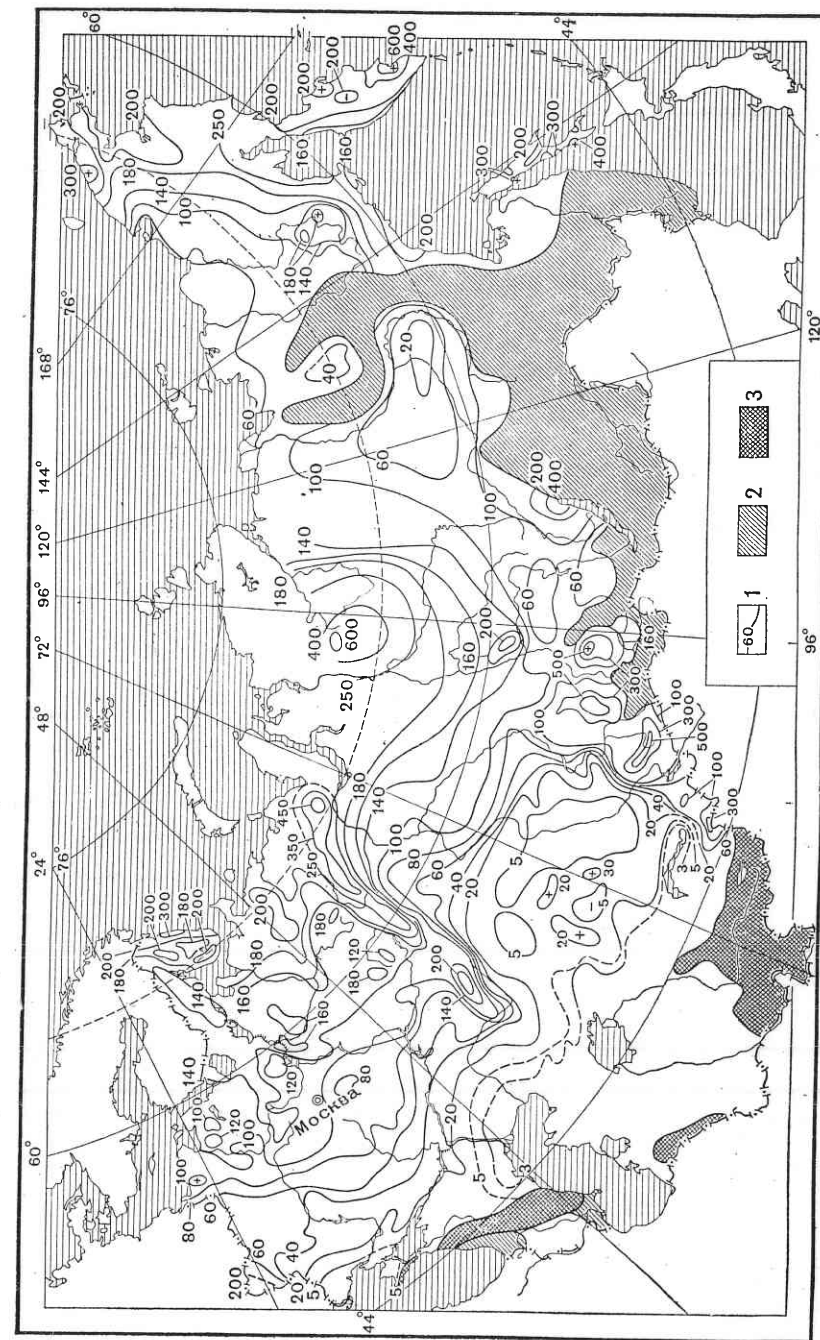


Рис. 30. Карта коэффициента вариации слоя стока половодья:
 1 — районы, где за расчетные приняты максимальные расходы половодья; 2 — районы, где за расчетные приняты максимальные расходы дождевых паводков; 3 — горные районы, в которых весеннее половодье не выделено.

здесь c — коэффициент, колеблющийся от 0,2 при $\bar{h} \geq 100$ мм до 0,4 при $\bar{h} < 100$ мм;

f'_{03} — средневзвешенный коэффициент озерности, определяемый по формуле:

$$f'_{03} = \sum_1^n \left(100 \frac{S_i}{F} \frac{f_i}{F} \right), \quad (177)$$

где F — площадь водосбора в створе проектируемого сооружения;

S_i — площадь зеркала озера;

f_i — площадь частного водосбора озера.

Поправочный коэффициент δ'_1 на снижение максимальных расходов воды рек, зарегулированных водохранилищами, вводят в каждом конкретном случае с учетом проектных материалов, освещающих режим попусков верхними водохранилищами.

Влияние залесенности и заболоченности бассейна на максимальный расход учитывается коэффициентом δ_2 , который определяют по формуле:

$$\delta_2 = 1 - \gamma \lg (0,05 f_n + 0,1 f_6 + 1), \quad (178)$$

где f_n — степень залесенности бассейна, %;

f_6 — степень заболоченности бассейна, %;

γ — эмпирический коэффициент, равный 0,8.

При заболоченности более 50% и преобладании верховых болот γ принимается равным 0,6.

Если $f_n < 5\%$ и $f_6 < 3\%$, то $\delta_2 = 1$. При величине озерности более 20% влияние залесенности и заболоченности также не учитывается.

Применение метода аналогии. Найденные расчетные максимальные расходы можно уточнить, пользуясь методом аналогии. Для этого необходимо иметь многолетние наблюдения по стоку половодья в смежных бассейнах. По данным бассейна-аналога определяют параметр:

$$K_{0a} = \frac{M_{1\%,a} (F_a + 1)^n}{h_{1\%,a} \delta_{1,a} \delta_{2,a}}, \quad (179)$$

где $M_{1\%,a}$ и $h_{1\%,a}$ — максимальный модуль (л/сек, км²) и слой стока половодий с вероятностью превышения 1%, мм. Эти величины находят по кривым обеспеченности, построенным по данным наблюдений в бассейне-аналоге.

Величины $\delta_{1,a}$ и $\delta_{2,a}$ вычисляют по формулам (176) и (178). Найденное по формуле (179) значение коэффициента дружности половодья K_{0a} принимают за расчетное для изучаемого бассейна.

В качестве аналога принимают бассейн, по которому имеются надежные гидрометрические данные и который должен быть расположен в одной природной зоне с изучаемым бассейном. Площадь бассейна-аналога не должна отличаться от площади неизученного бассейна более чем в 5 раз при $F \geq 1000$ км² и в 10 раз при $F < 1000$ км².

Приблизительно одинаковыми в обоих бассейнах должны быть форма бассейна, рельеф, характер почвогрунтов, заболоченность, озерность и направление течения по отношению к движению фронта снеготаяния.

Для правильного выбора аналога рекомендуется вычислить параметр K_0 по нескольким смежным бассейнам и взять среднее его значение. Если полученные значения K_0 отличаются друг от друга значительно (более чем на 20%), рекомендуется принимать в расчет большее из них.

Расчет максимальных расходов талых вод горных рек. Для горных рек с весенне-летним половодьем расчетный максимальный расход талых вод определяют по формуле:

$$Q_p = \frac{K_0 h_p F}{(F + 1)^{0,15}} \delta_1. \quad (180)$$

Параметр K_0 в этой формуле принимают по таблице 6 в зависимости от географического положения рассматриваемого бассейна.

Для уточнения значений K_0 , приведенных в таблице 6, применяется метод аналогии. Значение K_0 для аналога вычисляют по формуле:

$$K_0 = \frac{M_{1\%,a} (F_a + 1)^{0,15}}{h_{1\%,a} \delta_{1a}}. \quad (181)$$

ТАБЛИЦА 6

Географический район	Средняя величина бассейна $H_{ср}, м$	K_0	Географический район	Средняя величина бассейна $H_{ср}, м$	K_0
Урал	< 500	0,0025	Северо-Восток СССР	—	0,0030
Карпаты	> 500	0,0018	Камчатка	—	0,0010
Алтай	—	0,0045	Сахалин:	—	0,0014
	< 1000	0,0025	северный	—	0,0020
	1000—2000	0,0015	южный	—	0,0020
	> 2000	0,0010*			

* Для бассейнов рек Центрального Алтая (засушливые Чуйские степи) $K_0 = 0,0007$.

Расчет слоя стока половодья заданной вероятности превышения ведут по трем параметрам: $\bar{h}$, C_{vh} и C_{sh} .

Значения $\bar{h}$ и C_{vh} определяют по картам изолиний (рис. 29 и 30). Коэффициент асимметрии C_{sh} принимают по соотношению $C_{sh} = (3 \div 4) C_{vh}$.

Для уточнения расчета слоя стока половодья заданной вероятности превышения h_p рекомендуется построение региональных зависимостей $\bar{h} = f(H_{ср})$ и $C_{vh} = f(H_{ср})$, где $H_{ср}$ — средняя высота водосбора.

Величину коэффициента δ_1 определяют по формуле (176).

Для горных рек с летним половодьем (высокогорные районы СССР) расчетный максимальный расход талых вод:

$$Q_p = \frac{K_0 h_{p.r} F}{(F+1)^{0,15}} \delta_1, \quad (182)$$

где $h_{p.r}$ — расчетный слой годового стока.

Определение значения высоты расчетного слоя годового стока рек рассмотрено в главе IV.

Параметр K_0 определяют по бассейну-аналогу, для которого имеются многолетние наблюдения за стоком, по формуле:

$$K_0 = \frac{M_{1\%a} (F+1)^{0,15}}{h_{1\%г. а} \delta_{1a}}, \quad (183)$$

где $M_{1\%a}$ — модуль максимального стока бассейна-аналога с вероятностью превышения $p=1\%$, $м^3/сек, км^2$;

$h_{1\%г. а}$ — расчетный слой годового стока бассейна-аналога с вероятностью превышения $p=1\%$, $мм$.

При выборе бассейна-аналога, кроме указанных ранее требований, учитывается местоположение бассейна в горной системе, его удаленность и защищенность от влагоносных ветров, доля площади водосбора, расположенная выше снеговой линии, а также амплитуда высот (разность отметок створа и истока реки).

§ 5. Расчет максимальных расходов дождевых паводков при отсутствии данных наблюдений

Существующие методы расчета максимальных расходов дождевых паводков можно разделить на две основные группы:

- 1) по слою осадков и величине потерь на инфильтрацию;
- 2) по районным эмпирическим формулам на основании суммарного учета основных факторов формирования максимального стока.

Наиболее широкое распространение из методов первой группы получил метод Д. Л. Соколовского, впервые опубликованный в 1943 г. и дополненный в 1945 г.

Формула Д. Л. Соколовского имеет вид:

$$Q_{\max} = \frac{0,28 H_T \alpha F}{t_1} f \delta_1 \delta_2 + Q_{гр}, \quad (184)$$

где H_T — слой осадков ($мм$) за расчетный ливень продолжительностью T ч;

α — коэффициент стока;

F — площадь водосбора, $км^2$;

t_1 — продолжительностью подъема паводка в часах, принимаемая равной времени добегаания τ ;

f — коэффициент формы гидрографа;

0,28 — коэффициент размерности;

δ_1 — коэффициент снижения максимального расхода за счет озерно-болотной аккумуляции;

δ_2 — то же, за счет леса и проницаемых почв;

$Q_{гр}$ — расход грунтового питания, $м^3/сек$.

Д. Л. Соколовский считает, что гидрографы дождевых паводков лучше всего выражаются параболой с различной степенью кривизны для подъема и спада, а именно:

$$Q_x = Q_{\max} \left(\frac{x}{t_1} \right)^m, \quad (185)$$

$$Q_z = Q_{\max} \left(\frac{z}{t_2} \right)^n, \quad (186)$$

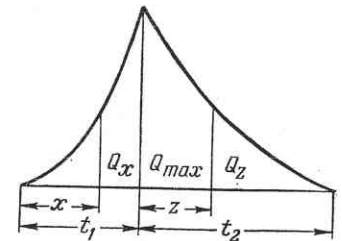


Рис. 31. Схема гидрографа паводка.

где Q_x и Q_z — ординаты гидрографа паводка на подъеме и спаде (рис. 31);

t_1 — продолжительность подъема паводка;

t_2 — продолжительность спада;

x — день или час от начала паводка;

z — то же, от пика.

Площадь левой части гидрографа равна:

$$W_1 = Q_{\max} \frac{t_1}{m+1},$$

а площадь правой части

$$W_2 = Q_{\max} \frac{t_2}{n+1}.$$

Вся площадь гидрографа паводка составляет:

$$W = W_1 + W_2 = Q_{\max} \left(\frac{t_1}{m+1} + \frac{t_2}{n+1} \right).$$

Обозначая $\frac{t_2}{t_1} = \gamma$, или $t_2 = \gamma t_1$, имеем:

$$W = Q_{\max} t_1 \left(\frac{1}{m+1} + \frac{\gamma}{n+1} \right),$$

отсюда

$$Q_{\max} = \frac{W}{t_1} \left[\frac{(m+1)(n+1)}{(n+1) + \gamma(m+1)} \right]. \quad (187)$$

Выражение в квадратных скобках Д. Л. Соколовский назвал коэффициентом формы гидрографа f . Тогда

$$Q_{\max} = \frac{W}{t_1} f. \quad (188)$$

Площадь гидрографа равна объему паводка, который можно выразить через слой паводка следующим образом:

$$W = k H_T \alpha F, \quad (189)$$

где k — переводной коэффициент, при исчислении H в $мм$, F в $км^2$ $k=1000$.

Подставив в формулу (188) значение W , по выражению (189) находят

$$Q_{\max} = \frac{1000 H_T \alpha F}{t_1} f.$$

Здесь время подъема t_1 в секундах. При исчислении его в часах:

$$Q_{\max} = \frac{0,28 H_T \alpha F}{t_1} f. \quad (190)$$

Для учета редукции максимумов вследствие аккумуляции дождевых вод в озерах, болотах и лесах в формулу (190) вводят коэффициенты δ_1 и δ_2 , которые определяют так же, как и для весеннего половодья.

Для рек, полностью дренирующих подземный сток (средние и большие реки), необходимо определить расход грунтового питания, который в первом приближении может быть принят равным среднему многолетнему расходу меженного периода:

$$Q_{\text{гр}} = \bar{Q}_{\text{меж}}. \quad (191)$$

Применение формулы Д. Л. Соколовского в различных районах СССР показывает достаточно хорошее соответствие вычисленных и наблюденных максимумов для сравнительно малых рек. Для больших бассейнов (при большом времени добегания) величина расхода по формуле (190) получается несколько преувеличенной. Точность расчета максимальных расходов по методу Д. Л. Соколовского зависит в большей мере от обоснованности принятия коэффициента стока.

Формула Г. А. Алексеева для расчета максимального модуля стока получена на основе схематизации и уточнения теории изохрон:

$$M_{\max} = \frac{q_0}{1 + \frac{q_0}{hv} L}, \quad (192)$$

где $M_{\max}$ — максимальный модуль стока, $\text{м}^3/\text{сек} \cdot \text{км}^2$;

q_0 — максимальная среднесуточная интенсивность водоотдачи заданной повторяемости, $\text{м}^3/\text{сек} \cdot \text{км}^2$;

h — суммарный слой водоотдачи или слой стока за паводок той же заданной повторяемости, мм ;

L — длина главного водотока, км ;

v — средняя скорость добегания стока по руслу, $\text{м}/\text{сек}$.

Расчетный максимальный расход равен

$$Q_{\max} = M_{\max} F. \quad (193)$$

Формула Г. А. Алексеева, приведенная в общем виде, может быть использована для расчетов максимумов как весенних (снеговых) половодий, так и дождевых паводков, при любых соотношениях между временем добегания τ и продолжительностью водоотдачи τ_v .

Если время добегания стока по главному руслу больше продолжительности водоотдачи, то есть максимальный расход формируется за счет всего слоя водоотдачи, что соответствует длине водотока более 3 км,

формула Г. А. Алексеева для расчета максимального расхода дождевых вод приобретает вид:

$$Q_{\max} = v h b r, \quad (194)$$

где v — скорость добегания стока по руслу.

h — слой паводочного стока;

b — средняя ширина водосбора, км ; $b = \frac{F}{L}$;

r — коэффициент зарегулированности максимального стока озерами и прудами.

Этот коэффициент находят по формуле:

$$r = \frac{1 - f_{\text{оз}}}{1 + 25 f_{\text{оз}}}, \quad (195)$$

здесь $f_{\text{оз}}$ — общая площадь озер и прудов в долях от площади водосбора.

Скорость добегания воды по руслу равна:

$$v = a I^{\frac{1}{3}} Q_{\max}^{\frac{1}{4}}, \quad (196)$$

где I — уклон водотока в промилле;

$Q_{\max}$ — максимальный расход;

a — параметр, значение которого определяется в зависимости от коэффициента шероховатости n по выражению:

$$a = 0,15 \left(\frac{1}{20n} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (197)$$

Так как для вычисления скорости добегания необходимо знать величину искомого расхода $Q_{\max}$, расчет по формуле (194) ведут методом постепенных приближений. В первом приближении обычно принимают $v = 0,5 \text{ м}/\text{сек}$.

Слой паводочного стока h , входящий в формулу (194), определяют методом гидрологической аналогии. Для этого на основании длительных наблюдений на реке-аналоге находят слой паводочного стока заданной повторяемости по кривой обеспеченности. Полученное значение слоя h подставляют в формулу (194) для вычисления максимального расхода.

При отсутствии подходящего аналога с длительным рядом наблюдений слой дождевого стока заданной повторяемости устанавливают по формуле:

$$h = (\sqrt{N} - \sqrt{N_0})^2, \quad (198)$$

где N — слой осадков за дождь повторяемостью один раз в N лет, мм , вычисляемый по формуле (161);

N_0 — слой начальных потерь до момента образования стока, мм .

Слой начальных потерь $N_0 = \frac{k}{\gamma}$, где k — интенсивность инфильтрации ($\text{мм}/\text{мин}$) для данной категории грунта, определяется по таблице

М. Ф. Срибно; γ — климатический параметр, принимаемый равным 0,03—0,04 в лесной зоне и в зоне муссонных дождей, 0,04—0,05 в лесостепной зоне и 0,05—0,06 в степной зоне.

В районных эмпирических формулах максимальный модуль стока связывают с одним аргументом, большей частью площадью водосбора, причем уменьшение максимального модуля стока с увеличением площади водосбора (редукция максимального модуля по площади) учитывают показателем степени при площади водосбора. Остальные факторы формирования паводочного максимума учитываются суммарно с помощью параметра, устанавливаемого по наблюдениям в данном районе.

Широкое распространение в практических расчетах получила приближенная эмпирическая формула, предложенная Д. Л. Соколовским, Б. В. Поляковым и А. В. Огиевским:

$$Q_{\max} = BV\sqrt{F} \text{ м}^3/\text{сек.} \quad (199)$$

Значение параметра B для обеспеченностей 50%, 10%, 3—2% и 1% вычислены Д. Л. Соколовским по укрупненным зонам территории Советского Союза. Для территории лесостепной и степной зон европейской части СССР значения параметра B уточнены К. П. Воскресенским.

В Государственном гидрологическом институте разрабатывают «Указания по определению расчетных максимальных расходов воды дождевых паводков при отсутствии или недостаточности гидрометрических наблюдений».

В них предусматривается два приема расчета ливневого максимума: для малых бассейнов ($F < 200 \text{ км}^2$) — по формуле предельной интенсивности и для бассейнов с $F > 200 \text{ км}^2$ по эмпирической формуле вида:

$$Q_p = rM_{200} \left(\frac{200}{F} \right)^n \lambda F, \quad (200)$$

где Q_p — максимальный расход расчетной обеспеченности p ;

r — коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода озерами;

M_{200} — модуль максимального расхода воды, обеспеченностью 1%, приведенный к площади водосбора 200 км^2 ;

n — показатель степени редукции (уменьшения) модуля максимального расхода;

λ — переходный коэффициент от обеспеченности 1% к другой обеспеченности.

§ 6. Расчетные расходы для проектирования осушительных систем

Величина расчетного расхода осушительных систем зависит не только от природных гидрологических и почвенных условий данной территории, но и от характера ее хозяйственного использования, который определяет необходимую интенсивность и сроки удаления воды с осушаемой территории.

Поэтому для определения расчетных расходов устанавливают критические периоды стока из условий хозяйственного использования осушаемой площади. При проектировании промышленных предприятий на осушаемой территории за расчетный (критический) принимают период максимальных половодий и летних паводков; при осушении под луга — период летних дождевых вод, так как кратковременное затопление лугов весной можно допустить. Для полевых севооборотов с озимыми культурами осушительную сеть рассчитывают на период максимального весеннего половодья, а для севооборотов без озимых культур — на предпосевной период, так как затопление пахотных угодий весенними водами задержало бы их обработку и посев. При осушении под сады расчетными являются периоды максимального весеннего половодья и дождевых паводков летом. Кроме того, во всех случаях необходим расчет на бытовые меженные воды.

Таким образом, при проектировании осушительных систем расчетными периодами стока являются максимальное весеннее половодье, предпосевной период, соответствующий началу весенних полевых сельскохозяйственных работ, максимальный летне-осенний (дождевой) паводок и межень, продолжающаяся от конца спада весеннего половодья до окончания полевых работ. На основании технико-экономических расчетов или норм проектирования осушительных систем для каждого из этих периодов устанавливают расчетную обеспеченность расхода.

Так, в соответствии с «Указаниями по проектированию осушительных систем», составленными Институтом «Росгипроводхоз» (1967 г.), обеспеченность расходов весеннего половодья, дождевого паводка и предпосевного паводка для полевых севооборотов равна 10%, обеспеченность расхода дождевого паводка при осушении под луга — 25%; расчетная обеспеченность расхода межennenного периода во всех случаях — 50%.

При наличии данных наблюдений расчетные максимальные расходы талых и дождевых вод определяют согласно СНиП II-И. 7—65. При отсутствии данных наблюдений расходы талых вод рассчитывают по СН 356—66, ливневых вод — по эмпирическим районным формулам, параметры которых находятся по методу аналогии.

Для определения расчетных расходов предпосевного периода предварительно устанавливают расчетную дату предпосевного периода, предшествующую на 7 дней дате сева. Предпосевной расход за каждый год вычисляют как средний из расходов за 5 дней, из которых третий день приходится на расчетную дату. На основании предпосевных расходов за ряд лет строят теоретическую кривую обеспеченности стока, по которой и находят величину предпосевного расхода расчетной обеспеченности.

При отсутствии данных наблюдений расчетный предпосевной расход определяют по методу аналогии или по районным эмпирическим формулам.

Минимальные расходы летне-осеннего периода и зимнего (периода межени) рассчитывают согласно СН 346—66 (см. § 7).

§ 7. Минимальный сток и условия его формирования

Минимальный сток формируется в период, когда река переходит на грунтовое питание и когда поверхностный сток полностью прекращается или имеет наименьшее значение.

На реках зоны избыточного увлажнения (тундровая и лесная) минимальный сток обычно наблюдается зимой, а на реках зоны недостаточного увлажнения — летом. Реки лесостепной зоны с переменным увлажнением (в том числе реки центральных и западных районов европейской части СССР) могут иметь минимальные расходы как летом, так и зимой.

Важнейшими факторами, влияющими на процессы формирования минимального стока и его величину, являются климатические, почвенно-геологические и гидрогеологические. Кроме того, на минимальный сток влияет наличие в бассейне озер, лесов, болот, а также размер бассейна.

Климат определяет как общий режим реки, так и режим минимального стока. В северной части СССР большое количество выпадающих осадков и сравнительно незначительное испарение обуславливают довольно устойчивый минимальный сток. В южных засушливых районах, где осадков выпадает мало, а испарение велико, минимальные расходы ничтожно малы.

Величина минимального стока зависит от величины и характера грунтового питания рек и от тех же факторов, которые определяют величину и характер подземного стока, в первую очередь почвенно-геологических и гидрогеологических условий.

Количество грунтовых вод, накапливающихся в верхних почвенных горизонтах, зависит от свойств почв, их водопроницаемости и удерживающей способности. Рыхлые лесные почвы хорошо задерживают поверхностный сток и способствуют образованию подземных вод под лесом. Поэтому минимальный сток рек с залесенными бассейнами обычно значительно выше, чем с незалесенных водосборов.

В зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения запасы верхних грунтовых вод незначительны и основную роль в питании рек играют глубокие подземные воды. В этих районах величина минимального стока зависит от глубины эрозионного вреза русла, числа и характера водоносных горизонтов и геологического состава пород. Чем больше водоносных горизонтов вскрывает долина и русло реки и чем они водообильнее, тем выше и устойчивее величина минимального стока. Водообильность водоносных горизонтов зависит от геологического состава пород. Рыхлые и пористые породы (песчаники, известняки, галечники) создают благоприятные условия для аккумуляции подземных вод, а плотные и кристаллические (глины, граниты, гнейсы и др.), наоборот, уменьшают инфильтрацию воды и аккумулирующую емкость бассейна.

Наземными аккумуляторами стока являются озера и отчасти болота. Озера повышают минимальный сток. В озерных бассейнах Карельской АССР минимальные модули стока составляют не менее 2—1,5

л/сек, в то время как на реках, не имеющих озерного регулирования, менее 0,5 л/сек с 1 км².

Влияние болот на минимальный сток зависит от типа болот и высоты стояния уровня грунтовых вод. Реки, вытекающие из низинных болот с уровнем грунтовых вод, близким к поверхности, имеют более высокий минимальный модуль по сравнению с незаболоченными реками. Наличие в бассейне верховых болот с низким стоянием уровня грунтовых вод приводит к уменьшению величины минимального стока.

С увеличением площади водосбора, как правило, увеличивается минимальный сток, так как усиливается глубина эрозионного вреза русла и, следовательно, увеличивается его аккумулирующая способность. В районах с неоднородным геологическим строением и разнообразными условиями подземного питания наблюдается не прямая, а обратная связь минимального модуля стока с площадью водосбора.

Зональность в распределении минимального стока. Величина минимального стока находится в большой зависимости от различных местных факторов, однако по мере увеличения площади водосбора влияние их сглаживается и величина минимального стока определяется главным образом климатическими факторами и запасами грунтовых вод.

В связи с этим в распределении минимального стока наблюдается закон географической зональности, что дает возможность построения карт изолиний средних многолетних величин минимального стока. Такие карты для больших и средних бассейнов составлены В. А. Урыбаевым, Б. В. Поляковым, Л. Н. Поповым и др.

Наиболее обоснованы карты, составленные Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) в 1966 г. (приложение к «Указаниям по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании» СН 346—66). В соответствии с этими картами норма месячного (30-дневного) минимального стока изменяется для летнего периода от 10—8 л/сек с 1 км² на севере европейской части СССР и 20—15 л/сек с 1 км² на северном Урале до 0—0,5 на юге и юго-востоке. Норма зимнего минимального стока изменяется от 2—3 л/сек с 1 км² на севере европейской части СССР до 0—0,25 л/сек с 1 км² на юге и юго-востоке (см. рис. 32 и 33).

Карты ГГИ составлены для определения минимального стока средних по площади бассейнов. На малых бассейнах основная роль в формировании минимального стока принадлежит местным физико-географическим факторам. Поэтому величина минимального модуля стока на малых бассейнах изменяется в больших пределах.

Пересыхание и промерзание рек. В период минимального стока река питается только за счет грунтовых вод. В тех случаях, когда поверхностный сток практически отсутствует в течение длительного времени, а запасы грунтовых вод невелики, река пересыхает, а зимой промерзает. Следовательно, в ряде случаев минимальный сток падает до нуля. Пересыхание наиболее характерно для весьма малых рек с неглубоким врезом русла и поэтому не дренирующих основные водоносные горизонты.

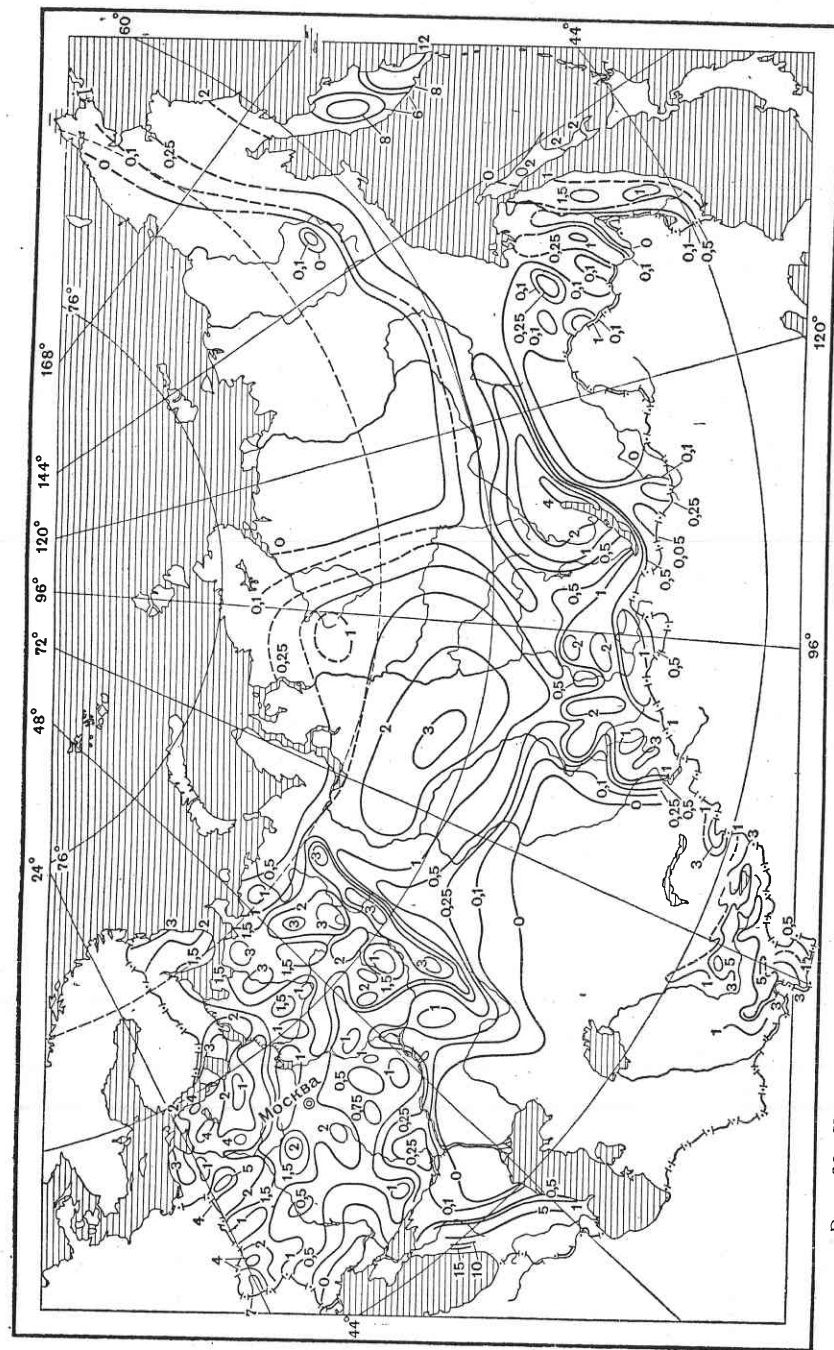


Рис. 32. Карта минимального среднегогодового 30-дневного зимнего стока рек СССР (л/сек с 1 км²).

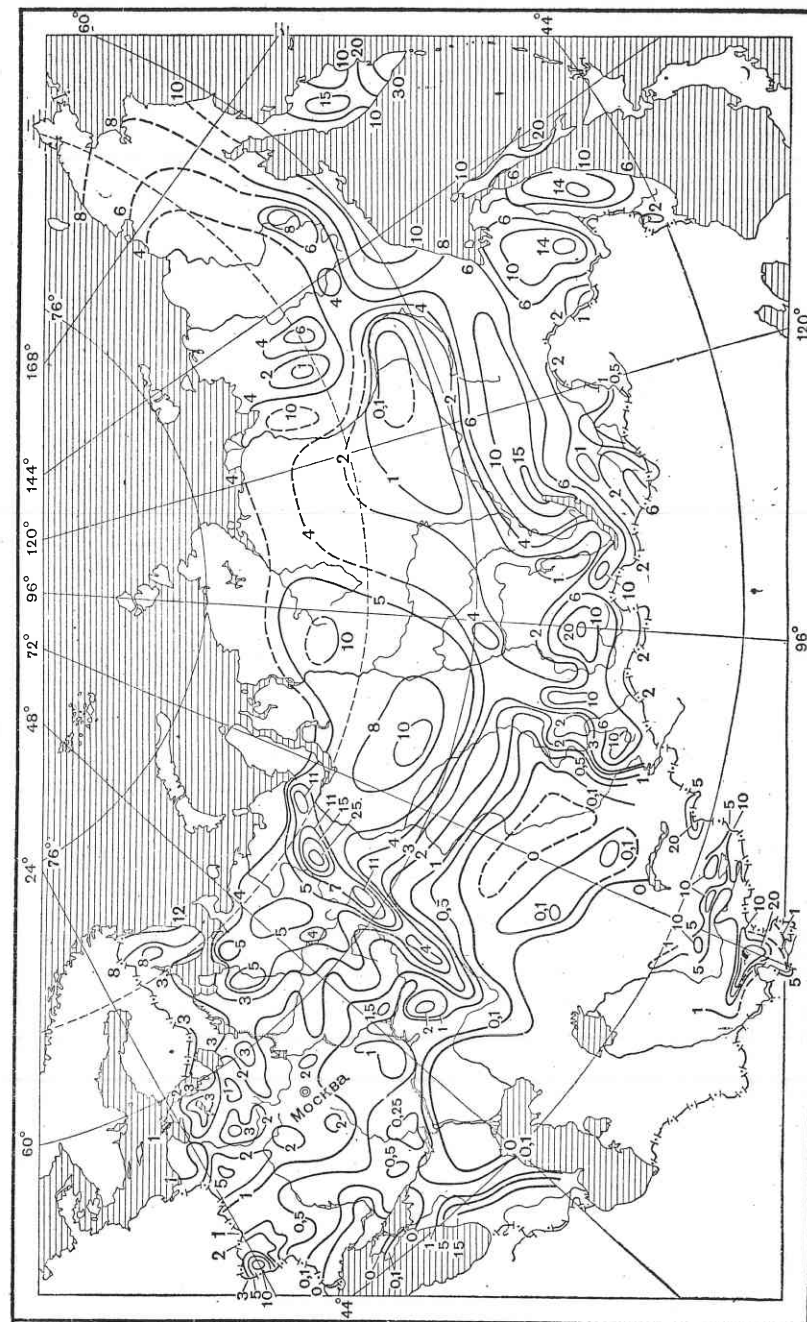


Рис. 33. Карта минимального среднегогодового 30-дневного летнего стока рек СССР (л/сек с 1 км²).

По мере перехода от северных увлажненных районов к южным засушливым осадки уменьшаются, а глубина залегания грунтовых вод увеличивается. В таком же направлении увеличиваются размеры бассейнов пересыхающих рек и продолжительность бессточного периода.

В лесной зоне, где грунтовые воды стоят высоко, систематически пересыхают реки с очень малыми водосборами (1—10 км²) и эпизодически со средними водосборами (сотни квадратных километров).

Пересыхание почти ежегодно наблюдается на реках южной части степной зоны. В бассейне нижнего Днепра и Южного Буга отмечено пересыхание рек с площадями водосбора 3000—10 000 км² (например, р. Орель), в Заволжье с площадью водосбора до 9000 км² (р. Большой и Малый Узень и др.). Наибольшую продолжительность пересыхания имеют реки Прикаспийской низменности, степных и полупустынных районов Казахстана.

Промерзание рек связано не только с истощением запасов грунтовых вод, но и с увеличением толщины льда, перекрывающего живое сечение малых рек. Изменение толщины льда зависит от климата. Поэтому пределы площадей водосборов промерзающих рек имеют зональное изменение и увеличиваются с юго-запада на северо-восток. Так, на севере европейской части СССР (Ленинградская область) систематически промерзают реки с площадью водосбора 50—100 км², а эпизодически и до 1000 км². На Урале промерзание рек с площадями водосбора до 100 км² наблюдается почти ежегодно. В зоне вечной мерзлоты Восточной Сибири и Дальнего Востока промерзают многие крупные реки, например р. Бытантой у устья ($F=40\,000\text{ км}^2$), р. Индигирка у пункта Майор-Крест ($F=172\,000\text{ км}^2$), р. Яна ниже впадения р. Бытантой ($F=200\,000\text{ км}^2$) и др.

§ 8. Расчеты минимального стока

Определение расчетных минимальных расходов воды при наличии гидрометрических данных. Эти расходы необходимо определять для обеспечения бесперебойного водоснабжения, орошения и обводнения, для целей судоходства, а также энергетического использования рек.

Минимальный сток при различной степени изученности бассейна рассчитывают в соответствии с «Указаниями по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании» (СН 346—66).

В качестве критерия при назначении расчетной величины минимального расхода воды реки принимают его ежегодную обеспеченность: при проектировании гидроэлектростанций 90—85%, орошения 80—85%, хозяйственно-питьевого водоснабжения 90—95% и т. д.

Для определения расчетного минимального расхода используют данные наблюдений по стоку за зимний и летне-осенний периоды. Расчет ведут по среднемесячным расходам; по средним за 30 дней с наименьшим стоком или по среднесуточным.

Среднемесячные расходы рекомендуется использовать для расчета в том случае, когда межень период продолжительный и устойчивый

(длится не менее двух месяцев и в течение этого времени на реке нет паводков).

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

При наличии длительных гидрометрических наблюдений расчетный минимальный расход определяют по теоретической кривой обеспеченности. Для этого определяют параметры кривой обеспеченности: средний многолетний минимальный расход $\bar{Q}_{\min}$, коэффициент вариации C_v и коэффициент асимметрии C_s .

Средний многолетний минимальный расход вычисляется как среднее арифметическое ряда

$$\bar{Q}_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}. \quad (201)$$

Среднюю квадратическую ошибку найденного значения $\bar{Q}_{\min}$ вычисляют по формуле:

$$E_{\bar{Q}_{\min}} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100\%. \quad (202)$$

Когда средняя квадратическая ошибка не превышает 15%, расчетные данные достаточно надежны; невыполнение этого условия приводит к необходимости удлинения ряда. Если этого сделать нельзя, расчет минимального стока проводят так же, как при отсутствии наблюдений.

Параметр C_v определяют по формуле:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum (K-1)^2}{n-1}}, \quad (203)$$

где

$$K = \frac{Q_i}{\bar{Q}_{\min}}. \quad (204)$$

При наличии в ряду минимальных расходов нулевых значений (промерзание и пересыхание рек) определение коэффициента вариации рекомендуется производить графо-аналитическим способом по эмпирической кривой обеспеченности.

Для определения параметра C_v может быть также применен метод наибольшего правдоподобия, изложенный в главе IV.

Параметр C_s выбирают по соотношению с C_v , исходя из наилучшего соответствия теоретической кривой обеспеченности фактическим данным наблюдений. Обеспеченность наблюдаемых минимальных расходов воды рекомендуется определять по формуле:

$$p = \frac{m-0,3}{n+0,4} 100\%. \quad (205)$$

Теоретическую кривую обеспеченности строят на основании кривых трехпараметрического гамма-распределения.

Расчетное значение минимального расхода определяют по выражению:

$$Q_p = K_p \bar{Q}_{\min} \quad (206)$$

где K_p — ордината кривой обеспеченности, соответствующая расчетной обеспеченности p .

Для установления расчетного минимального расхода по короткому периоду наблюдений параметры кривой обеспеченности приводят к многолетнему периоду методом гидрологической аналогии, то есть с помощью длительных наблюдений на реке-аналоге.

Бассейн-аналог выбирают по сходству климатических условий и однородности условий формирования минимального стока, особенно по сходству гидрогеологического строения бассейна, количеству и водообильности водоносных горизонтов, принимающих участие в питании рек. Кроме того, бассейн-аналог должен быть сходным с изучаемым бассейном по площади водосбора, условиям аккумуляции стока, отсутствию факторов, существенно искажающих минимальный сток (водохранилища и т. п.).

Для рек с меженным периодом длительностью меньше 2 месяцев с рядом наблюдений до 5 лет средних многолетний минимальный расход можно определить по формуле

$$\bar{Q}_{\min} = \bar{Q}_a \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{ср. а}}}, \quad (207)$$

где $\bar{Q}_{\min}$ и $\bar{Q}_a$ — многолетние среднесуточные (30-дневные) минимальные расходы воды изучаемой реки и реки-аналога;

$Q_{\text{ср}}$ — среднесуточный (30-дневный) минимальный расход за короткий период наблюдений;

$Q_{\text{ср. а}}$ — среднесуточный (30-дневный) минимальный расход воды за тот же период наблюдений по реке-аналогу.

Второй параметр кривой обеспеченности минимального стока — коэффициент вариации C_v в случае короткого ряда наблюдений для средних рек принимают по бассейну-аналогу; для малых рек определяют по формуле:

$$C_v = C_{v а} \frac{\bar{Q}_a}{Q_{\text{ср}}}, \quad (208)$$

где $C_{v а}$ — коэффициент вариации для реки-аналога.

Коэффициент асимметрии для увлажненных районов равен $2C_v$, для недостаточно увлажненных районов — $(1 \div 1,5) C_v$.

По найденным параметрам кривой обеспеченности минимального стока по формуле (206) вычисляют расчетный минимальный расход.

При коротком периоде наблюдений, но тесной прямолинейной связи с бассейном-аналогом расчетные минимальные расходы воды могут быть установлены по графику связи. График связи между минималь-

ным стоком в изучаемом бассейне и бассейне-аналоге строят по минимальным расходам за совместный период наблюдений.

По кривой обеспеченности минимального стока, построенной на основании длительных наблюдений в бассейне-аналоге, определяют минимальный расход, соответствующий расчетной обеспеченности $Q_{p, а}$. Откладывая полученное значение расхода на графике связи, находят соответствующее ему значение расчетного минимального расхода в изучаемом бассейне.

Определение расчетных минимальных расходов воды при отсутствии или недостаточности гидрометрических данных. При отсутствии или недостаточности гидрометрических данных расчетные минимальные расходы также определяют по кривой обеспеченности минимального стока, но параметры кривой определяют по картам изолиний, эмпирическим формулам или другими косвенными способами.

Данные наблюдений считаются недостаточными, если по объему и качеству они непригодны для осуществления статистических расчетов даже с использованием метода гидрологической аналогии.

В связи с тем что процессы формирования минимального стока на малых бассейнах имеют ряд особенностей, расчет параметров кривой обеспеченности минимальных расходов для малых и средних рек ведут по-разному.

Деление рек на малые и средние в расчетах минимального стока зависит от географического положения реки (района) и типа определяемого минимума (летне-осенний или зимний).

В СН 346—66 приведены карты районирования территории СССР по минимальному стоку малых рек за летне-осенний и зимний периоды, а также дана таблица наибольших площадей бассейнов малых рек по районам. Наибольшие площади малых рек для летне-осеннего периода находятся в пределах 800—10 000 км², для зимнего — 800—5000 км².

К средним относятся реки с площадью бассейна, превышающей указанные выше пределы, но не более 75 000 км².

Средний многолетний расход находят следующими способами. Для средних безозерных бассейнов $\bar{Q}_{\min}$ находят с помощью карт изолиний минимального стока. Карты выражают распределение среднего многолетнего 30-дневного минимального модуля стока зимнего периода (см. рис. 32) и летне-осеннего периода (рис. 33). Значение $\bar{M}_{\min}$ снимают с карты для центра тяжести бассейна или вычисляют как средневзвешенную величину.

По найденному с помощью карты модулю минимального стока вычисляют средний многолетний 30-дневный минимальный расход:

$$\bar{Q}_{\min} = \frac{\bar{M}_{\min} F}{10^3} \text{ м}^3/\text{сек.} \quad (209)$$

Точность определения минимального стока по картам изолиний составляет в среднем от $\pm 10\%$ (в увлажненных районах) до $\pm 20\%$ (в районах недостаточного увлажнения).

Величину среднего многолетнего месячного, или 30-дневного, минимального расхода ($\bar{Q}_{\text{мин}}$) для средних равнинных рек можно также определить интерполяцией между пунктами, имеющими многолетние наблюдения за минимальными расходами, расположенными вблизи расчетного створа. При гористом рельефе интерполировать следует с учетом изменения высоты местности.

Для малых рек средний многолетний 30-дневный минимальный расход зимнего или летне-осеннего периода определяют по эмпирической зависимости вида:

$$\bar{Q}_{\text{мин}} = a(F + c)^n, \quad (210)$$

где F — площадь бассейна, км²;

a, n, c — параметры, определяемые в зависимости от географических районов по таблицам СН 346—66.

Для учета регулирующего влияния озер, расположенных вблизи расчетного створа реки, средний многолетний минимальный расход воды рекомендуется определять по зависимости:

$$\bar{Q}_{\text{оз}} = \bar{Q}_3 + 0,37\beta Q_0, \quad (211)$$

где $\bar{Q}_3$ — минимальный среднемесячный, или 30-дневный, зимний расход реки, определяемый с помощью карты или по формуле (210);

Q_0 — средний многолетний годовой расход воды (норма стока);

β — относительная емкость озера, вычисляемая по формуле:

$$\beta = \frac{S}{W}, \quad (212)$$

где S — емкость озера в пределах многолетней амплитуды колебания уровня воды;

W — средняя многолетняя величина притока в озеро.

Если расчетный створ расположен ниже озера на значительном расстоянии и между расчетным створом и озером есть притоки, то средний многолетний минимальный расход воды определяют путем сложения поступающего из озера минимального расхода воды, вычисляемого по формуле (211), и среднего многолетнего минимального расхода боковой приточности реки.

Минимальный среднесуточный расход воды можно вычислить по формуле:

$$\bar{Q}_{\text{сут}} = \frac{\bar{M}_{\text{сут}} F}{10^3}, \quad (213)$$

где $\bar{M}_{\text{сут}}$ — минимальный среднесуточный модуль стока, определяемый по зависимости

$$\bar{M}_{\text{сут}} = a\bar{M}_{\text{мин}} - b, \quad (214)$$

где $\bar{M}_{\text{мин}}$ — средний многолетний 30-дневный минимальный модуль стока, определяемый по карте или на основании формулы (210);

a, b — параметры, принимаемые по таблице в зависимости от района и периода (зимний или летний).

Второй параметр кривой обеспеченности (коэффициент вариации минимального стока C_v) определяют по таблице, приводимой в нормах СН 346—66 в зависимости от величины среднего многолетнего минимального модуля стока ($\bar{M}_{\text{мин}}$) и географического района.

Третий параметр принимают для увлажненных районов $C_s = 2C_v$, для районов недостаточного увлажнения $C_s = (1-1,5) C_v$.

Определив все параметры кривой обеспеченности, по таблицам трех-параметрического гамма-распределения находят ординату кривой, соответствующую расчетной обеспеченности K_p , а по ней величину расчетного минимального расхода:

$$Q_p = K_p \bar{Q}_{\text{мин}}.$$

Для горных территорий (Кавказа, Средней Азии) величины минимального стока можно определять по зависимости, связывающей модуль минимального стока со средней высотой бассейна реки $M_{\text{мин}} = f(H_{\text{ср}})$. Такие зависимости строят для однородных по гидрогеологическому строению и одинаковых в отношении влагоносных ветров районов.

Наиболее изученными с точки зрения минимального стока являются малые реки Украинской ССР. В нормах (СН 346—66) приведены таблицы значений минимального 30-дневного стока малых рек УССР с обеспеченностью 97%; расходы других обеспеченностей вычисляют с помощью переходных коэффициентов.

Глава VII. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ СТОКА

Основным фактором, определяющим общую величину стока и его распределение по периодам года, является климат (температура, влажность и давление воздуха, испарение и осадки.). Кроме климата, на процессы формирования стока оказывают влияние величина и форма бассейна, его рельеф, почвенный и растительный покров, геологическое строение, озерность, заболоченность и залесенность, наличие ледников и вечной мерзлоты и другие физико-географические факторы.

Дополнительные физико-географические факторы в той или иной мере воздействуют на общий гидрологический режим, созданный климатом, и изменяют его. Наиболее важные климатические факторы стока рассмотрены ниже.

§ 1. Влажность воздуха

Влажность воздуха определяется количеством содержащихся в нем водяных паров. Водяные пары — наиболее подвижная и неустойчивая часть атмосферы — непрерывно находятся то в стадии образования (испарение), то в стадии конденсации (осадки). Поэтому количество их постоянно меняется в весьма широких пределах. Влажность воздуха характеризуется следующими величинами.

Абсолютная влажность. За абсолютную влажность принимают количество водяных паров, содержащихся в единице объема воздуха. Так как массы паров в единице объема при неизменной темпе-

ратуре пропорциональны их упругостям, то количество паров можно заменить их упругостью. Поэтому абсолютной влажностью можно называть также упругость паров e , которые в данный момент находятся в воздухе.

Изменение абсолютной влажности в течение суток и года зависит от температуры воздуха. Наибольшая абсолютная влажность бывает в теплое, наименьшая — в холодное время года.

Относительная влажность. Отношение абсолютной влажности e к упругости водяных паров e_0 , необходимых для полного насыщения воздуха при той же температуре, называется относительной влажностью:

$$r = \frac{e}{e_0} 100\%. \quad (215)$$

Насыщающая упругость водяных паров e_0 зависит от температуры. Чем выше температура воздуха, тем больше водяных паров он может содержать, то есть с повышением температуры насыщающая упругость возрастает.

Относительная влажность в течение суток имеет наибольшее значение утром, минимальное — в послеполуденное время. В годовом ходе максимум относительной влажности наблюдается в холодное время, минимум — в теплое время года.

Точка росы. Температура воздуха, при которой водяные пары, находящиеся в воздухе, достигают стадии насыщения, называется точкой росы. При понижении температуры ниже точки росы начинается конденсация водяных паров.

Дефицит влажности. Разность между упругостью водяного пара, насыщающего пространство при данной температуре, и упругостью пара, находящегося в воздухе, называется дефицитом влажности:

$$d = e_0 - e. \quad (216)$$

По формуле (216) можно определить дефицит влажности для каждого срока наблюдения температуры воздуха и абсолютной влажности. Эти наблюдения ведутся четыре раза в сутки: в 1 ч, 7 ч, 13 ч и 19 ч. Из дефицитов, определенных за каждый срок наблюдений, вычисляют среднесуточный дефицит как его среднее арифметическое. Из среднесуточных дефицитов получают среднемесячное значение и т. д. Однако такой путь расчета очень трудоемкий. Поэтому среднемесячный дефицит влажности за прошедший период определяют по среднемесячной абсолютной влажности и среднемесячной температуре воздуха. При этом значение месячного дефицита влажности получается заниженным вследствие того, что связь насыщающей упругости пара e_0 с температурой не является прямолинейной. Для уточнения дефицита влажности, вычисленного по среднемесячным значениям абсолютной влажности и температуры, Э. М. Ольдекоп предложил вводить поправку:

$$\Delta d = 0,09 A^2 \frac{d^2 e}{dt^2}, \quad (217)$$

где A — разность между максимальной температурой за месяц по срочным наблюдениям и средней месячной температурой;

$\frac{d^2 e}{dt^2}$ — интенсивность изменения упругости пара при изменении температуры, определяемая по таблицам.

Таким образом, среднемесячный дефицит влажности равен:

$$d_{\text{ср. мес}} = d + 0,09 A^2 \frac{d^2 e}{dt^2}, \quad (218)$$

где d — дефицит влажности (мм), вычисленный по среднемесячным значениям e_0 и e .

Значение среднегодового дефицита влажности находят как среднее арифметическое из месячных дефицитов.

Среднее значение из годовых дефицитов ряда лет принимают за норму дефицита влажности. При отсутствии наблюдений норму дефицита влажности определяют по карте изолиний.

Приборы для измерения влажности воздуха. Для наблюдений над влажностью воздуха на метеорологических станциях пользуются психрометрами, гигрометрами, а также самопишущими приборами — гигрографами.

Психрометр стационарный состоит из двух термометров: сухого и смоченного (рис. 34). Шарик смоченного термометра обернут батистом, конец которого опущен в стаканчик с водой, благодаря чему шарик остается всегда влажным. Смоченный термометр показывает температуру, более низкую, чем сухой, так как влага с поверхности шарика непрерывно испаряется а на испарение затрачивается тепло. Чем суше воздух, тем сильнее испаряется вода с шарика, тем больше разница между показаниями обоих термометров психрометра. С увеличением влажности воздуха испарение ослабевает и показания смоченного термометра меньше отличаются от показаний сухого термометра. При полном насыщении воздуха показания обоих термометров совпадают.

По разности температур сухого и смоченного термометров по специальным (психрометрическим) таблицам определяют значения абсолютной и относительной влажности.

Переносный (вентиляционный) психрометр состоит также из двух термометров (сухого и влажного), заключенных в никелированную оправу (рис 35), предохраняющую их от действия солнечных лучей. В верхней части прибора находится вентилятор, приводимый в движение часовым механизмом. С помощью вентилятора в прибор всасывается наружный воздух, который обтекает резервуары термометров. Это позволяет пользоваться переносными психрометрами при любых условиях без дополнительной защиты.

Психрометрами определяют влажность воздуха при температурах не ниже -5° .

Волосной гигрометр позволяет определять относительную влажность в любое время года. Действие гигрометра основано на свойстве человеческого волоса удлиняться и укорачиваться

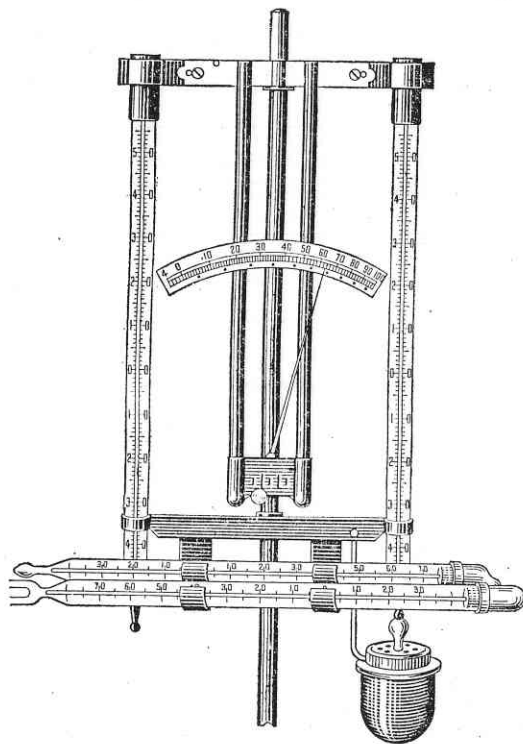


Рис. 34. Стационарный психрометр с волосным гигрометром, максимальным и минимальным термометрами.

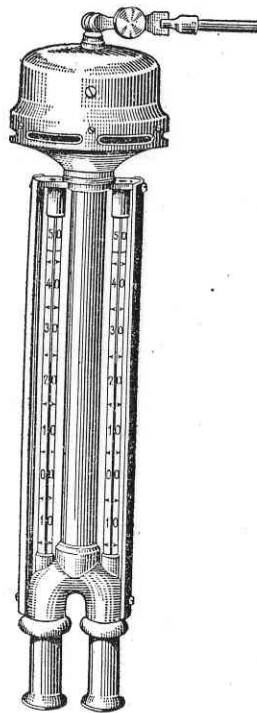


Рис. 35. Переносный психрометр Асмана.

соответственно увеличению или уменьшению влажности воздуха. Один конец обезжиренного волоса прикреплен к раме, а другой перекинут через блок и снабжен гирькой; на оси блока вращается стрелка (рис. 34). При изменении влажности воздуха волос деформируется и гирька соответственно поднимается или опускается, вызывая перемещение стрелки по шкале.

Наблюдения над влажностью воздуха проводятся ежедневно в 1 ч, 7 ч и 19 ч.

Гигрограф — прибор для непрерывной автоматической записи относительной влажности воздуха. Воспринимающей частью прибора является пучок обезжиренных волос, деформация которых, происходящая под влиянием изменения влажности, передается через систему рычагов стрелке с пером. Перо соприкасается с лентой, надетой на цилиндрический барабан, непрерывно вращающийся под действием часового механизма. Если часовой механизм имеет суточный завод, то перо вычерчивает на ленте прибора кривую изменения влажности

за сутки; при недельном заводе получаем кривую изменения влажности за неделю. Гигрограф устанавливают в метеорологической будке.

§ 2. Испарение

Испарение это процесс превращения воды в пар. Испарение происходит с поверхности воды, льда и снега, с поверхности почвы и с растительного покрова. Физическая сущность этого процесса очень сложна и пока еще недостаточно изучена. Особенно сложны последние два вида испарения.

Испарение с водной поверхности можно представить следующим образом. Молекулы воды находятся в непрерывном движении; двигаясь во всевозможных направлениях с различными скоростями, некоторые молекулы воды преодолевают силу молекулярного притяжения и, отделяясь от поверхности воды, переходят в воздух, находящийся над этой поверхностью. С повышением температуры воды скорость движения молекул возрастает, а следовательно, возрастает и число молекул, скорость которых по величине и направлению достаточна для отрыва их от поверхности воды. Поэтому чем выше температура воды, тем интенсивнее происходит испарение.

С увеличением содержания в воздухе водяных паров упругость их возрастает и наконец достигает некоторого значения, при котором пар насыщает пространство. При полном насыщении водяными парами воздуха, расположенного над испаряющей поверхностью, процесс испарения прекратится. Следовательно, испарение зависит от разности между упругостью водяного пара, насыщающего пространство при температуре поверхности воды, и упругостью водяного пара, фактически находящегося в воздухе.

Чем выше температура воздуха, тем больше требуется водяных паров для его насыщения. Поэтому с повышением температуры воздуха интенсивность испарения увеличивается.

Интенсивность испарения возрастает также вследствие турбулентного перемешивания масс воздуха, которое, в свою очередь, усиливается с увеличением скорости ветра. При этом на место воздуха, в какой-то мере насыщенного водяными парами, поступают новые массы воздуха, менее обогащенного водяными парами. На турбулентность воздушного потока над водной поверхностью влияет разность температур воды и воздуха.

Таким образом, к основным факторам, которые определяют испарение с водной поверхности, относятся: разность упругости водяного пара, насыщающего пространство при температуре поверхности воды и абсолютной влажности ($e_0 - e$), интенсивность турбулентного перемешивания, характеризуемая скоростью ветра, и температура воды и воздуха.

Испарение сопровождается потерей тепла. Для перехода одного грамма воды при 0°C в пар требуется 597 грамм-калорий тепла, которое называется скрытой теплотой испарения. Зная количество тепла, за-

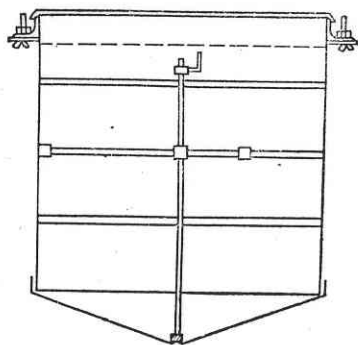


Рис. 36. Испаритель ГГИ-3000.

трачиваемое на испарение, можно определить количество испарившейся жидкости.

Наблюдения над испарением с водной поверхности ведут на водноиспарительных станциях с помощью специальных приборов — испарителей и испарительных бассейнов. Стандартный сетевой прибор для измерения испарения с водной поверхности — испаритель ГГИ-3000. Он представляет собой металлический сосуд (рис. 36) с площадью испаряющей поверхности 3000 см². В центре испарителя установлена вертикально латунная

трубка (реперная), к концу которой прикреплена коленчатая игла. Острие иглы находится на 7,5 см ниже борта испарителя. Испаритель наполнен водой до уровня, совпадающего с концом иглы.

Измерение уровня воды в испарителе производится с помощью специальной объемной бюретки, устанавливаемой на реперную трубку (в 7 ч и 19 ч). Количество выпавших осадков учитывают наземным дождемером, который установлен рядом с испарителем. Слой испарившейся воды между сроками наблюдений вычисляют по уравнению:

$$E = x + (h_1 - h_2) k, \quad (219)$$

где E — слой испарения, мм;

x — слой выпавших осадков, мм;

h_1 — высота стояния уровня в испарителе в первый срок наблюдений;

h_2 — высота стояния уровня в испарителе во второй срок наблюдений;

k — поправочный коэффициент измерительной трубки.

Испарители ГГИ-3000 устанавливают как на суше, на берегу водоема, так и на поверхности воды на специально оборудованных плотках. В первом случае их называют наземными, во втором — плавучими испарителями.

Величина испарения, получаемая по наземным и плавучим испарителям, в большой мере зависит от размера испаряющей поверхности, то есть площади испарителя, с уменьшением которой интенсивность испарения возрастает, что объясняется конструктивными особенностями испарителя. Исследованиями Валдайской гидрологической лаборатории установлено, что отмеченная закономерность наблюдается при площади испаряющей поверхности меньше 20 м². На показания испарительного бассейна площадью 20 м² конструктивные особенности прибора не оказывают существенного влияния. С увеличением площади бассейна свыше 20 м² интенсивность испарения возрастает в результате увеличения над водной поверхностью скорости ветра и

градиента влажности воздуха по сравнению с подобными характеристиками над окружающей сушей.

В связи с этим в СССР за эталон принят испарительный бассейн площадью 20 м² и глубиной 2 м.

Для приведения данных наблюдений по различным испарителям к испарению с поверхности испарительного бассейна-эталона величины испарения, получаемые по испарителям, умножают на переходный (редукционный) коэффициент.

В. И. Кузнецов (ВНИГЛ) составил карту изолиний средних многолетних переходных коэффициентов от наземных испарителей ГГИ-3000 к бассейну 20 м².

Показания испарительного бассейна 20 м² соответствуют испарению с малых водохранилищ и прудов (площадью до 5 км²). Испарение с водоемов больших размеров увеличивается в среднем на 15—20%.

В настоящее время водноиспарительная сеть СССР насчитывает 455 станций, оборудованных испарителями ГГИ-3000; 55 испарительных бассейнов площадью 20 м² и около 30 плавучих испарительных установок.

Расчеты испарения с водной поверхности представляют большое научное и практическое значение. При исследованиях и расчетах водного баланса различных водных объектов и отдельных территорий, при хозяйственных расчетах водохранилищ и в других случаях необходимо знать норму испарения и ее внутригодовое распределение, а также испарение различной обеспеченности.

В соответствии с Проектом технических указаний, составленным Государственным гидрологическим институтом, расчет испарения с водной поверхности ведут отдельно для малых, средних и больших водоемов.

К малым относятся водоемы с площадью до 5 км² округлой или квадратной формы, имеющие среднюю длину разгона воздушного потока над водной поверхностью до 2—3 км; к средним — водоемы с площадью от 5 до 100 км², а к большим — озера и водохранилища площадью свыше 100 км².

Среднюю многолетнюю величину (норму) испарения с малых водоемов, расположенных в равнинных условиях, определяют следующим образом.

При наблюдениях на испарительных бассейнах 20 м² или наземных испарителях ГГИ-3000, данные которых приведены к бассейну 20 м², вычисляют среднее значение величин E_{20} . К полученному значению испарения вводят поправки на глубину водоема K_n и на защищенность водоема древесной растительностью, строениями, крутыми берегами и другими препятствиями K_z . Для водоемов, расположенных в северных районах лесных и лесостепных зон, кроме того, вводят еще поправку на площадь (K_w). Таким образом норма испарения

$$E_{0,в} = E_{20} K_n K_z K_w. \quad (220)$$

Поправку на глубину водоема находят по таблице в зависимости от местоположения водоема и его глубины.

Поправку на защищенность водоема K_3 определяют в зависимости от отношения средней высоты препятствий h к средней длине разгона воздушного потока L_{cp} , то есть $K_3 = f\left(\frac{h}{L_{cp}}\right)$.

Среднюю длину разгона воздушного потока вычисляют как среднее взвешенное из расстояний по водному зеркалу, с учетом повторяемости ветра.

Значение поправок на площадь K_ω изменяется от 1 ($\omega=20 \text{ м}^2$) до 1,28 ($\omega=5 \text{ км}^2$).

При наличии данных наблюдений по плавучим испарителям для вычисления нормы испарения предварительно в показания приборов вводят поправки: инструментальную и на разность температуры воды в испарителе и водоеме. Если испаритель расположен не в центре водоема, то необходимо вводить поправку и на длину разгона воздушного потока.

При отсутствии данных наблюдений норму испарения с малых водоемов находят по карте изолиний средних многолетних величин испарения с водной поверхности бассейна 20 м^2 (рис. 37). Снятое с карты значение E_{20} уточняется также путем введения поправок на глубину водоема, защищенность от ветра и площадь, то есть

$$E_{0,в} = E_{20} K_n K_3 K_\omega.$$

По внутригодовому распределению испарения с малых водоемов территорию Советского Союза можно разделить на 8 зон (рис. 37). Для каждой зоны получены значения месячных величин испарения в процентах от суммы за безледоставный период (табл. 7).

ТАБЛИЦА 7

Зона	Испарение с поверхности малых водоемов по месяцам, %											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
I	—	—	—	—	—	(20)	(45)	(30)	(5)	—	—	—
II	—	—	—	—	7	28	33	23	9	—	—	—
III	—	—	—	—	16	25	21	20	11	4	—	—
IV	—	—	—	3	16	22	21	19	12	6	1	—
V	—	—	—	6	14	20	21	19	12	6	2	—
VI	—	—	3	6	13	17	20	19	13	7	2	—
VII	—	1	4	7	13	16	19	17	12	7	3	—
VIII	2	3	4	7	12	15	16	16	12	7	4	2

Установив по карте, к какой зоне относится рассматриваемый водоем, распределяют найденное значение нормы испарения по месяцам в соответствии с данными таблицы 7.

Величина испарения расчетной обеспеченности равна:

$$E_p = K_p E_{0,в} \quad (221)$$

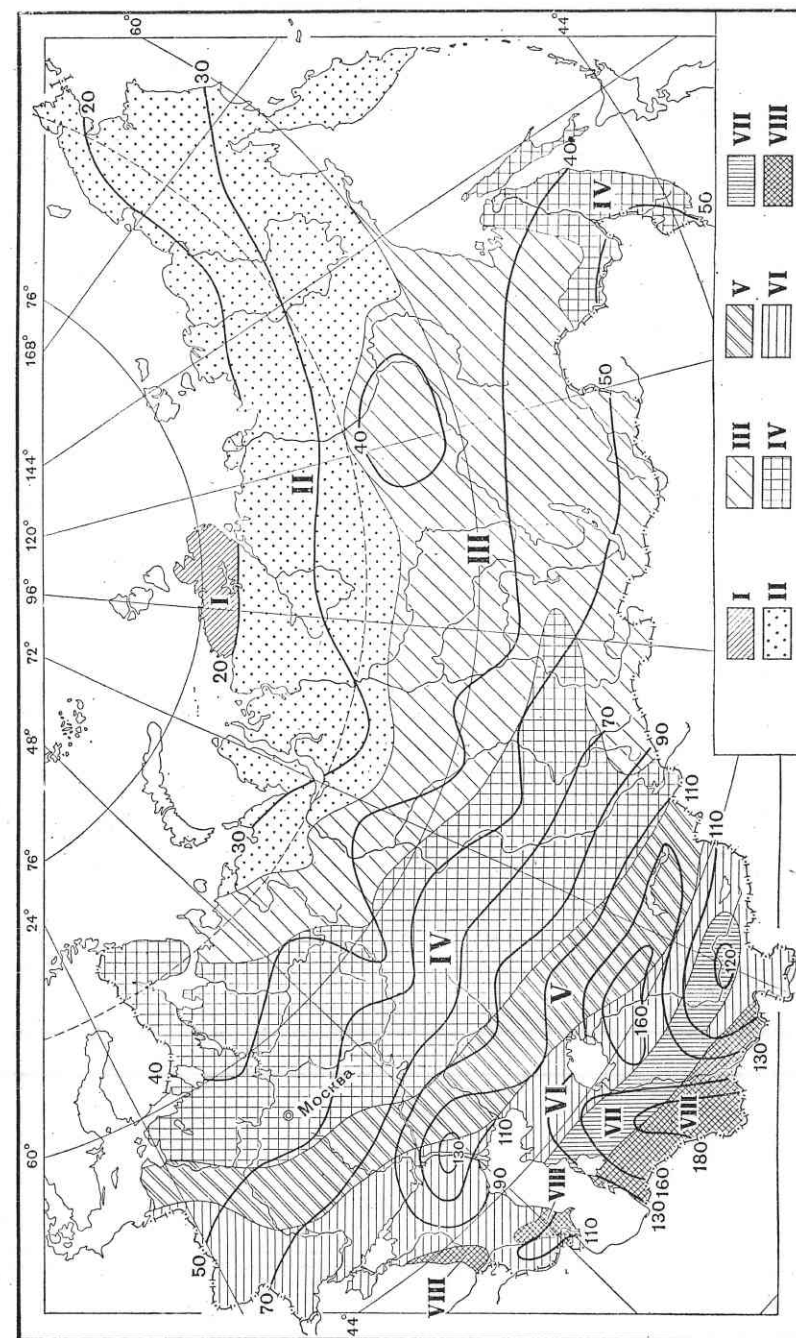


Рис. 37. Карта средних многолетних величин испарения с водной поверхности бассейна площадью 20 м^2 и схема районирования СССР по типу внутригодового хода испарения.

где $E_{0,в}$ — норма испарения;

K_p — ордината кривой обеспеченности, определяемая по коэффициенту вариации испарения C_v и коэффициенту асимметрии C_s .

Для большей части территории СССР (I—V зоны) значение коэффициента вариации испарения $C_v=0,15$. Для южных районов (VI—VIII зоны) $C_v=0,10$.

При наличии наблюдений на плавучей испарительной установке величину испарения с водоемов средних размеров можно рассчитать по той же методике, что и для малых водоемов.

При отсутствии данных наблюдений испарение со средних водоемов вычисляют на основании эмпирических формул.

Наиболее широкое применение получили формулы Б. Д. Зайкова (1949 г.), а также А. П. Браславского и З. А. Викулиной (1954 г.), достаточно хорошо обоснованные фактическими данными наблюдений. Обе формулы аналогичны по структуре, но различаются числовым коэффициентом, который в формуле Б. Д. Зайкова равен 0,15, а во второй формуле — 0,13.

В проекте Технических условий рекомендуется расчетная формула со средним значением коэффициента, равным 0,14:

$$E = 0,14n(e_0 - e_{200})(1 + 0,72u_{200}), \quad (222)$$

где E — испарение, мм;

e_0 — среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре поверхности воды, мб;

e_{200} — средняя абсолютная влажность воздуха над водоемом на высоте 200 см (мб);

u_{200} — средняя скорость ветра над водоемом на высоте 200 см (м/сек);

n — число дней в расчетном периоде.

Для расчета испарения по формуле (222) надо знать средние значения входящих в нее элементов (температуру поверхности воды, абсолютную влажность и скорость ветра), измеренных непосредственно над водоемом. Однако для проектируемых и большинства существующих водоемов таких данных нет. Поэтому входящие в формулу элементы рассчитывают по материалам наблюдений метеорологических станций, расположенных на суше.

Скорость ветра на метеорологических станциях измеряется флюгером на высоте порядка 10 м. Установлено, что изменение скорости ветра с высотой соответствует логарифмическому закону. Поэтому показания флюгера u_ϕ можно привести к скорости ветра на высоте 2 м по формуле:

$$u_{200} = u_\phi \frac{\lg \frac{200}{z_0}}{\lg \frac{z_\phi}{z_0}}, \quad (223)$$

где z_ϕ — высота установки флюгера;

z_0 — параметр шероховатости.

На водоиспарительных станциях с 1948 г. скорость ветра измеряют на высоте 2 м от поверхности суши.

При переходе воздушного потока с суши на водоем происходит значительная трансформация, то есть изменяются все элементы потока: температура, влажность, скорость ветра. Последняя изменяется вследствие существенных различий между шероховатостью суши и водной поверхностью. Скорость ветра над водоемом значительно больше, чем над окружающей его сушей. А. П. Браславский и З. А. Викулина провели одновременные наблюдения за скоростью ветра над сушей и водной поверхностью в различных районах страны при разных условиях защищенности местности. На основании полученных данных ими установлены значения коэффициента перехода от скорости ветра на суше к ее величине над водоемом.

Максимальную упругость водяного пара определяют по температуре поверхности воды, которая может быть принята по данным наблюдений на водоеме-аналоге или рассчитана по материалам наблюдений метеорологических станций. Расчет ведут по способу, разработанному А. П. Браславским и З. А. Викулиной, на основе использования метода теплового баланса.

Абсолютную влажность воздуха над водоемом определяют по формуле:

$$e_{200} = e'_{200} + (0,8e_0 - e'_{200})M_T, \quad (224)$$

где e_{200} — средняя влажность воздуха над водоемом, мб;

e'_{200} — средняя за расчетный период влажности воздуха, измеренная на метеостанции, мб;

e_0 — максимальная упругость пара, подсчитанная по температуре поверхности воды, мб;

M_T — коэффициент трансформации, учитывающий среднее изменение влажности воздуха в зависимости от пребывания воздушного потока под водоемом, определяемый по графику $M_T = f(L_{cp}, t^\circ)$, приводимому в технических указаниях.

На основании средних многолетних значений метеорологических элементов по формуле (222) рассчитывают месячные величины испарения. Суммируя величины испарения за месяцы безледового периода, получают испарение за сезон (год), то есть норму испарения.

Расчет испарения за конкретные годы производится аналогично, но с использованием данных за эти годы.

Испарение с больших озер и водохранилищ рассчитывают по формуле (222). Если водоем расположен в однородных климатических условиях и не имеет больших по площади участков, характеризующихся резко отличающимися условиями защищенности и глубины, то расчет испарения ведут так же, как и для средних водоемов. Для весьма больших водоемов, площадью свыше 1000 км², расчет испарения проводят по участкам с последующим осреднением для всей акватории водоема.

Испарение с поверхности снега и льда — сложный процесс и исследован значительно слабее, чем испарение с водной поверхности.

Испарение со снежного покрова и льда происходит в том случае, когда упругость пара в воздухе над снегом или льдом (e) меньше, чем упругость пара, насыщающего пространство при температуре испаряющей поверхности e_n .

При постоянной относительной влажности воздуха с повышением его температуры увеличивается абсолютная влажность, что приводит к уменьшению разности упругости водяного пара ($e_n - e$) и уменьшению испарения. При некотором значении температуры воздуха разность упругости водяного пара ($e_n - e$) достигает нулевого значения и испарение прекращается. Дальнейшее повышение температуры воздуха приводит к тому, что абсолютная влажность воздуха превышает упругость пара, насыщающего пространство при температуре испаряющей поверхности, то есть $e > e_n$. В таком случае происходит конденсация пара. Конденсация водяного пара на поверхности снега и льда, минуя жидкую фазу, называется сублимацией.

Испарение с поверхности снега и льда измеряют при помощи цилиндрических сосудов различных диаметров и высоты. Эти приборы наполняют снегом и ставят в снег на уровне поверхности. По изменению веса прибора определяют количество испарившегося снега или сконденсировавшихся паров из окружающего воздуха. Точность таких испарителей невысокая из-за выдувания снега из прибора.

Испарение с поверхности снега при одной и той же температуре обычно меньше, чем испарение с поверхности льда. Это объясняется меньшей теплопроводностью снега, вследствие чего температура на его поверхности оказывается ниже, чем на поверхности льда.

Интенсивность испарения со снега зависит от его плотности: на участках с уплотненным снежным покровом испарение идет более интенсивно, чем на участках с рыхлым свежавывалившимся снегом.

Величина испарения с поверхности снега может быть вычислена по формуле П. П. Кузьмина:

$$E_{сн} = 0,18 (e_n - e_{200}) (1 + 0,54 u_{1000}) \text{ мм/сутки}, \quad (225)$$

где e_n — упругость пара при температуре испаряющей поверхности, мб;

e_{200} — абсолютная влажность воздуха на высоте 200 см, мб;

u_{1000} — скорость ветра на высоте флюгера 1000 см, м/сек.

Испарение со снежного покрова очень невелико по сравнению с испарением за летний период. Для европейской части СССР испарение за 4 зимних месяца (декабрь — март) составляет 25—30 мм.

Испарение с поверхности почвы зависит от тех же факторов, что и испарение с водной поверхности: дефицита влажности, подсчитанного по температуре испаряющей поверхности, ветра и температуры воздуха. Кроме того, на испарение с почвы в большой мере влияют и другие специфические факторы, из которых наиболее важна влажность почвы, так как при ее отсутствии ни ветер, ни температура уже не играют никакой роли.

В период дождя и после него, когда верхний слой почвы обильно увлажнен, испарение с поверхности почвы аналогично испарению с вод-

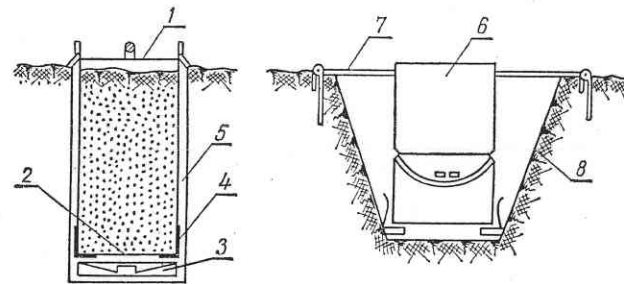


Рис. 38. Почвенный испаритель ГГИ-500-50:

1 — внутренний цилиндр; 2 — дно с отверстием; 3 — сосуд для сбора просочившейся воды; 4 — защелка дна; 5 — наружный цилиндр; 6 — дождемерное ведро; 7 — кольцевая сетка; 8 — конусный бак.

ной поверхности. Отличие состоит в том, что почва перед дождем бывает сильно прогрета, и поэтому смачивающая ее вода испаряется быстрее.

Когда дождей нет, испарение происходит с зеркала грунтовых вод, находящихся ниже поверхности почвы. Если упругость паров воздуха в почве ($e_{почв.}$) превышает упругость паров приземного слоя атмосферы (e_a), водяные пары в результате диффузии перемещаются снизу вверх. Таким образом, интенсивность испарения зависит и от дефицита влажности и от влажности почвы.

По мере увеличения иссушенного слоя испарение с почвы уменьшается. Плотные почвы, обладающие большей капиллярностью, испаряют сильнее, чем рыхлые. Некоторое значение имеет цвет почвы, рельеф поверхности, ориентация ее по отношению к странам света (с южных склонов испарение происходит интенсивнее, чем с северных и западных).

Испарение с почвы измеряют с помощью почвенных испарителей. Сущность метода состоит в том, что испарение с почвы между сроками наблюдений определяют по изменению веса почвенного монолита, помещенного в испаритель, с учетом выпавших осадков за тот же период времени и количества воды, просочившейся через монолит. Изменение веса устанавливают путем взвешивания; осадки измеряют с помощью почвенного дождемера. Воду, просочившуюся через монолит и собравшуюся в водосборном сосуде испарителя, измеряют стаканом дождемера.

На почвенно-испарительных станциях пользуются почвенными испарителями ГГИ-500-50 (площадью 500 см², высотой 50 см) и ГГИ-500-100 (площадью 500 см², высотой 100 см).

Испаритель ГГИ-500-50 (рис. 38) состоит из внутреннего и внешнего цилиндров и водосборного сосуда. Во внутренний цилиндр помещается почвенный монолит с ненарушенной структурой. Дно внутреннего цилиндра съемное с отверстиями, через которые вода, просочившаяся через монолит, попадает в водосборный сосуд. При взвешивании и измерении количества просочившейся воды водосборный сосуд открепляется от внутреннего цилиндра испарителя.

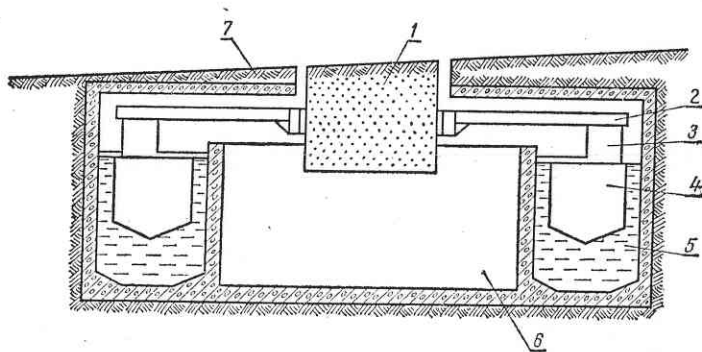


Рис. 39. Схема устройства гидравлического испарителя большой модели:

1 — почвенный монолит; 2 — опорная консоль; 3 — шейка поплавка; 4 — кольцевой поплавок; 5 — кольцевой бассейн, наполненный водой; 6 — простор для работы наблюдателя; 7 — насыпной грунт на крышке прибора

Испаритель ГГИ-500-100 отличается от испарителя ГГИ-500-50 лишь высотой.

К недостаткам весового метода измерения испарения относится изоляция почвенного монолита от окружающей почвы.

Более точно испарение с почвы можно измерять с помощью гидравлических почвенных испарителей, основанных на принципе гидростатического взвешивания монолита.

В Валдайской научно-исследовательской лаборатории ГГИ (1950 г.) установлен гидравлический испаритель большой модели, предложенный В. А. Урываевым и разработанный им совместно с К. С. Пецулем.

В центре прибора помещен почвенный монолит, площадью 5 м^2 , глубиной 2 м . Монолит заключен в стальной кожух, соединенный с 12 радиально расходящимися консолями, которые опираются на выступы (шейки) поплавка. Поплавок погружен в воду кольцевого бассейна (рис. 39). Вес монолита и кожуха с консолями (около 40 т) уравновешивается подъемной силой поплавка. Суммарная площадь 12 шеек поплавка подобрана равной площади испаряющей поверхности прибора. Поэтому изменение веса почвенного монолита (выраженное в толщине слоя воды) вследствие испарения, конденсации или выпадения осадков на его поверхность соответствует вертикальному перемещению плавающей системы испарителя относительно уровня воды в бассейне. Эти перемещения регистрируются при помощи трех самописцев уровня, расположенных под углом 120° . Барабаны самописцев имеют суточный завод. Средняя кривая, полученная по данным трех самописцев, характеризует изменение положения центра тяжести почвенного монолита. Таким образом, прибор позволяет с большой точностью регистрировать суточный ход испарения с поверхности почвенного монолита.

Наряду с измерением испарения, конденсации и осадков в испарителе предусмотрено измерение поверхностного стока и количества воды,

просочившейся сквозь толщу монолита. Тем самым прибор позволяет изучать все составляющие водного баланса. За многолетний период его эксплуатации удалось выяснить очень важные вопросы по испарению с поверхности почвы, растительного покрова и снега, изучить зависимость испарения от различных гидрометеорологических факторов.

Для более широкого использования гидростатического взвешивания В. А. Урываев и П. Н. Бурцев разработали конструкцию гидравлического испарителя малой модели (рис. 40).

Почвенный монолит испарителя площадью $0,2 \text{ м}^2$, глубиной $1,25\text{—}1,50 \text{ м}$ заключен в металлический цилиндр, помещенный во внешний цилиндре — чехле. Последний опирается на кольцевой поплавок — понтон, плавающий в резервуаре с водой. Общий вес плавающей системы с почвенным монолитом около 800 кг . Степень погружения поплавка регулируется набором гирь, которые загружаются в вертикальные цилиндрические шахты, расположенные под углом 120° в плоскости поплавка.

Вертикальные перемещения плавающей системы показывают изменение веса почвенного монолита, обусловленного испарением, конденсацией или выпадением осадков. Эти перемещения измеряют с помощью микрометрических винтов, укрепленных под углом 120° на специальной раме крышки испарителя. Под измерительным устройством на поплавке установлена чашечка со ртутью. Микрометрический винт оканчивается двумя иглами, соприкосновение которых со ртутью замыкает цепь и зажигает индикаторную лампочку. В этот момент берется отсчет по лимбу винтов. Таким образом, вертикальные перемещения плавающей системы могут быть определены с точностью $0,1 \text{ мм}$. Происходящие при этом изменения уровня воды в баке определяют при помощи отдельного поплавка и такого же микрометрического винта, какие служат для измерения перемещения плавающей системы.

Гидравлические испарители малой модели рекомендованы для опорной сети агрометеорологических станций. В настоящее время такие приборы установлены в 15 пунктах территории СССР.

Испарение с растительного покрова включает транспирацию и испарение осадков, задержанных кронами деревьев, листьями растений.

Рассмотренный ранее процесс испарения с водной поверхности представляет собой простой переход от жидкого состояния в газообразное; испарение с почвы, хотя и осложняется специфическими услови-

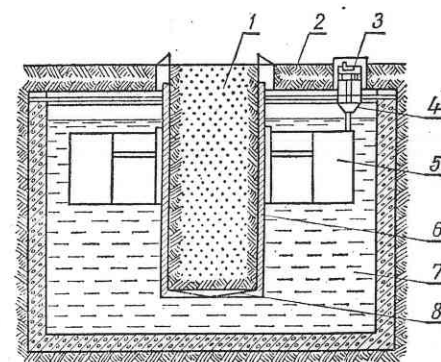


Рис. 40. Схема устройства гидравлического испарителя малой модели:

1 — почвенный монолит; 2 — слой почвы на крышке бака; 3 — микрометрический винт; 4 — чашечка со ртутью; 5 — кольцевой поплавок; 6 — металлический цилиндр с тепловой изоляцией; 7 — бак с водой; 8 — водосборный сосуд.

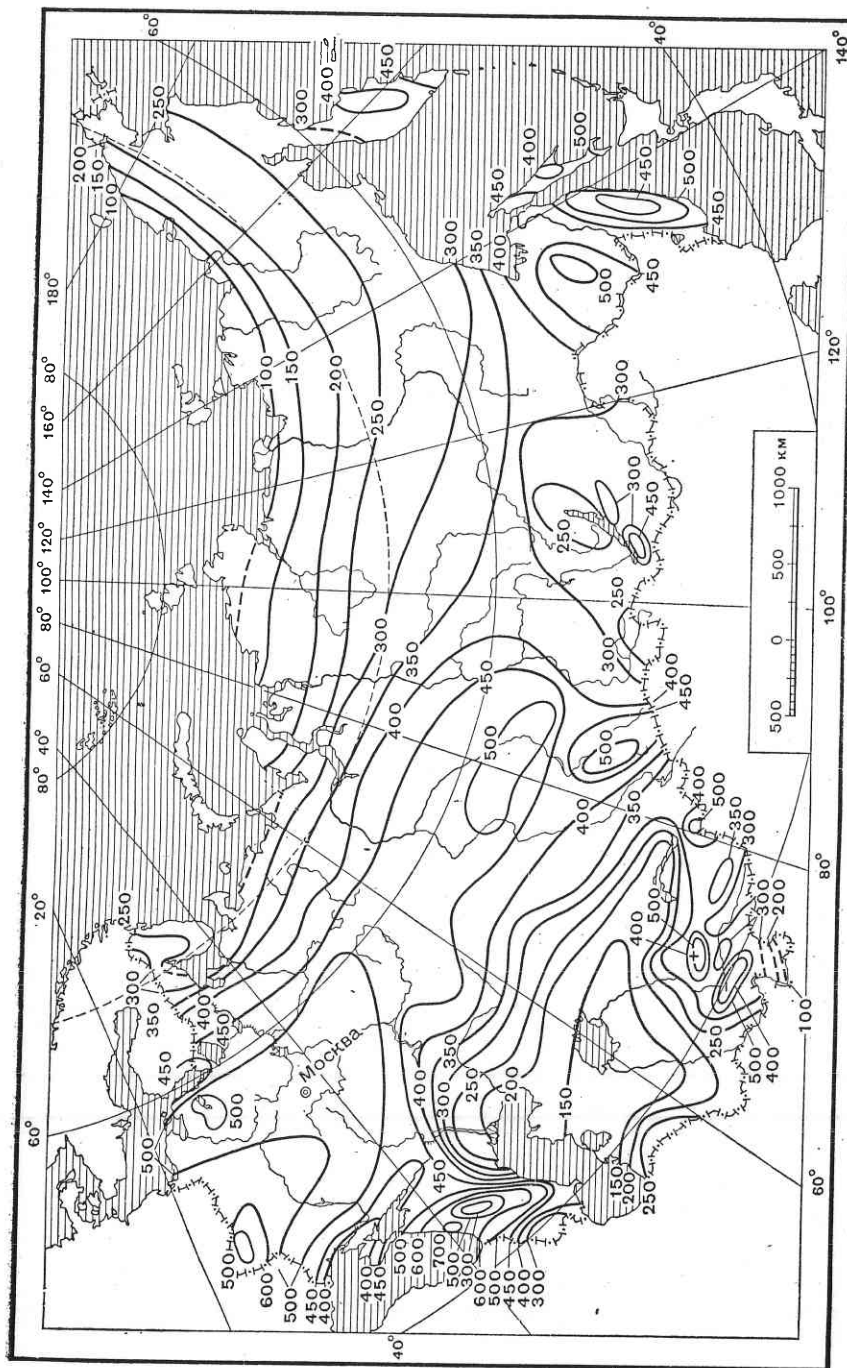


Рис. 41. Карта среднего годового слоя испарения (мм).

ями почвенной структуры и наличием почвенной влаги, но все же представляет собой тот же физический процесс, лишь в более сложных условиях.

Транспирация растений — это физиологический процесс, сущность которого состоит в следующем. Для своего питания растение забирает воду из почвы и подает ее по сосудам вверх, где небольшая часть воды идет на выработку ткани самого растения, то есть на его прирост, а избыток в парообразном состоянии удаляется через устьица листьев в атмосферу.

Количество воды, которое растение должно пропустить через себя, чтобы образовать 1 г сухого вещества, называется транспирационным коэффициентом. Величина транспирации зависит от вида растений и изменяется в больших пределах.

К основным факторам, влияющим на транспирацию, относится в первую очередь солнечная радиация и влажность почвы, которые главным образом обуславливают жизнь растений и интенсивность их роста.

Величину транспирации измеряют почвенными испарителями. Для измерения транспирации крупных растений (деревьев), корневая система которых превышает объем почвенного монолита в обычных испарителях, создают специальные испарительные установки, работающие по принципу весового метода.

Суммарное испарение с речного бассейна — это сумма всех видов испарения с территории речного бассейна. При гидрологических и водохозяйственных расчетах, при мелиоративном проектировании часто нужно знать суммарную величину испарения не разделенную на различные виды.

Среднюю многолетнюю величину годового суммарного испарения (норму) определяют: по методу водного баланса, по уравнению связи водного и теплового балансов и по методу турбулентной диффузии с использованием данных метеорологических станций.

Метод водного баланса. Из уравнения водного баланса речного бассейна для многолетнего периода норма годового суммарного испарения (E_0) равна норме осадков x_0 без нормы стока y_0 :

$$E_0 = x_0 - y_0. \quad (226)$$

Исходя из уравнения (226) в ГГИ построена карта изолиний норм годовых величин суммарного испарения (рис. 41).

Норму годового испарения с малых бассейнов находят при помощи карты для центра тяжести бассейна интерполяцией между ближайшими изолиниями. Для значительных по размерам бассейнов норму годового испарения находят по карте изолиний как средневзвешенную величину. Ошибка определения испарения по карте составляет около 12%.

Уравнение связи. На основании анализа уравнения водного баланса и данных наблюдений по осадкам и стоку установлено наличие связи между членами водного баланса. Э. М. Ольдекоп выра-

зил эту связь формулой:

$$E_0 = E_{\max} \operatorname{th} \frac{x_0}{E_{\max}}, \quad (227)$$

где E_0 — норма испарения;
 $E_{\max}$ — максимально возможная величина испарения при данных метеорологических условиях;
 x_0 — норма осадков;
 th — символ гиперболического тангенса.

Анализируя экспериментальные материалы наблюдений, М. И. Будыко пришел к выводу, что испарение в многолетнем разрезе в значительной мере зависит от количества осадков и величины радиационного баланса, причем с увеличением осадков и притока радиационного тепла величина испарения возрастает. Полагая, что $E_{\max} = \frac{B_0}{l}$, М. И. Будыко преобразовал формулу (227) в такое уравнение связи:

$$E_0 = \frac{B_0}{l} \operatorname{th} \frac{x_0}{B_0}, \quad (228)$$

где l — скрытая теплота испарения;
 B_0 — средняя многолетняя величина радиационного баланса.
 Радиационный баланс представляет собой разность между величиной суммарной солнечной радиации, поглощаемой поверхностью земли, и эффективным излучением. Эффективное излучение — разность между излучением земной поверхности и поглощенным ею встречным излучением атмосферы.

Дальнейшими исследованиями М. И. Будыко установил, что экспериментальным данным лучше отвечает уравнение связи в виде:

$$E_0 = \sqrt{\frac{B_0 x_0}{l} \left(1 - e^{-\frac{B_0}{l x_0}}\right)} \operatorname{th} \frac{l x_0}{B_0}, \quad (229)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Согласно этому уравнению составлена номограмма (рис. 42), по которой норма суммарного испарения определяется в зависимости от нормы осадков (x_0) и среднего многолетнего радиационного баланса (B_0). Распределение радиационного баланса по территории СССР представлено в виде карты изолиний (рис. 43). Норму осадков для заданного пункта находят по климатологическому справочнику СССР.

Результаты расчета для одного пункта распространяются на окружающую площадь, размеры которой определяются радиусом действия принятых в расчет величин осадков и радиационного баланса.

Для подсчета испарения с больших речных бассейнов (территорий) на карту бассейна наносят все метеорологические станции с многолетним рядом наблюдений за осадками. Устанавливают площади бассейна, тяготеющие к каждой станции. При равномерном распределении станций по бассейну среднюю для всего бассейна величину испарения вычисляют по способу средней арифметической. При неравномер-

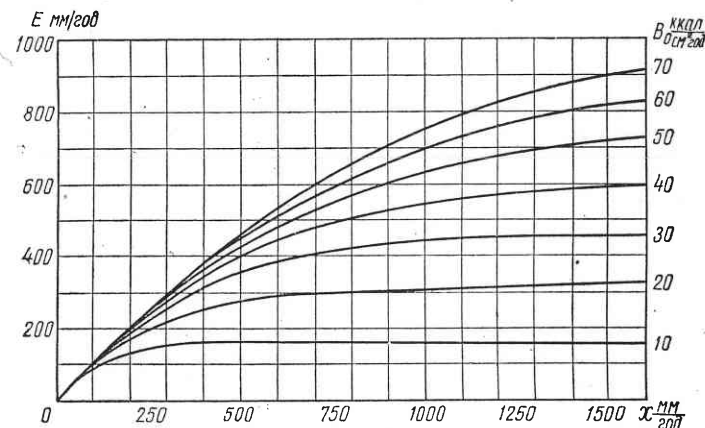


Рис. 42. Номограмма для вычисления среднего многолетнего годового испарения (E_0 мм/год) по уравнению связи.

ном распределении станций по бассейну испарение с водосбора определяют по методу средневзвешенной величины.

Метод турбулентной диффузии. Расчет интенсивности испарения по методу турбулентной диффузии основан на установлении закономерности перемещения водяного пара в приземном слое атмосферы.

Расчетная зависимость этого метода имеет вид:

$$E = \rho k \frac{\partial e}{\partial z}, \quad (230)$$

где E — интенсивность испарения, или поток водяного пара;
 ρ — плотность воздуха;
 k — коэффициент турбулентного обмена;
 $\frac{\partial e}{\partial z}$ — градиент изменения содержания водяного пара по высоте.

Для конечного интервала высоты $\Delta z = z_1 - z_2$ градиент влажности представляет собой разность между значениями абсолютной влажности на двух уровнях — z_1 и z_2 . Для определения коэффициента турбулентного обмена k нужно найти разность скорости ветра Δu и температуры воздуха Δt минимум на двух уровнях.

Таким образом, для расчета испарения методом турбулентной диффузии необходимо иметь данные измерения скорости ветра, температуры и влажности воздуха минимум на двух уровнях. На метеорологических станциях эти элементы измеряют только на одной высоте. В связи с этим Р. А. Константинов разработал методику расчета суммарного испарения методом турбулентной диффузии с использованием данных метеорологических станций.

В результате специальных исследований была установлена связь вертикальных градиентов температуры и влажности воздуха, а также

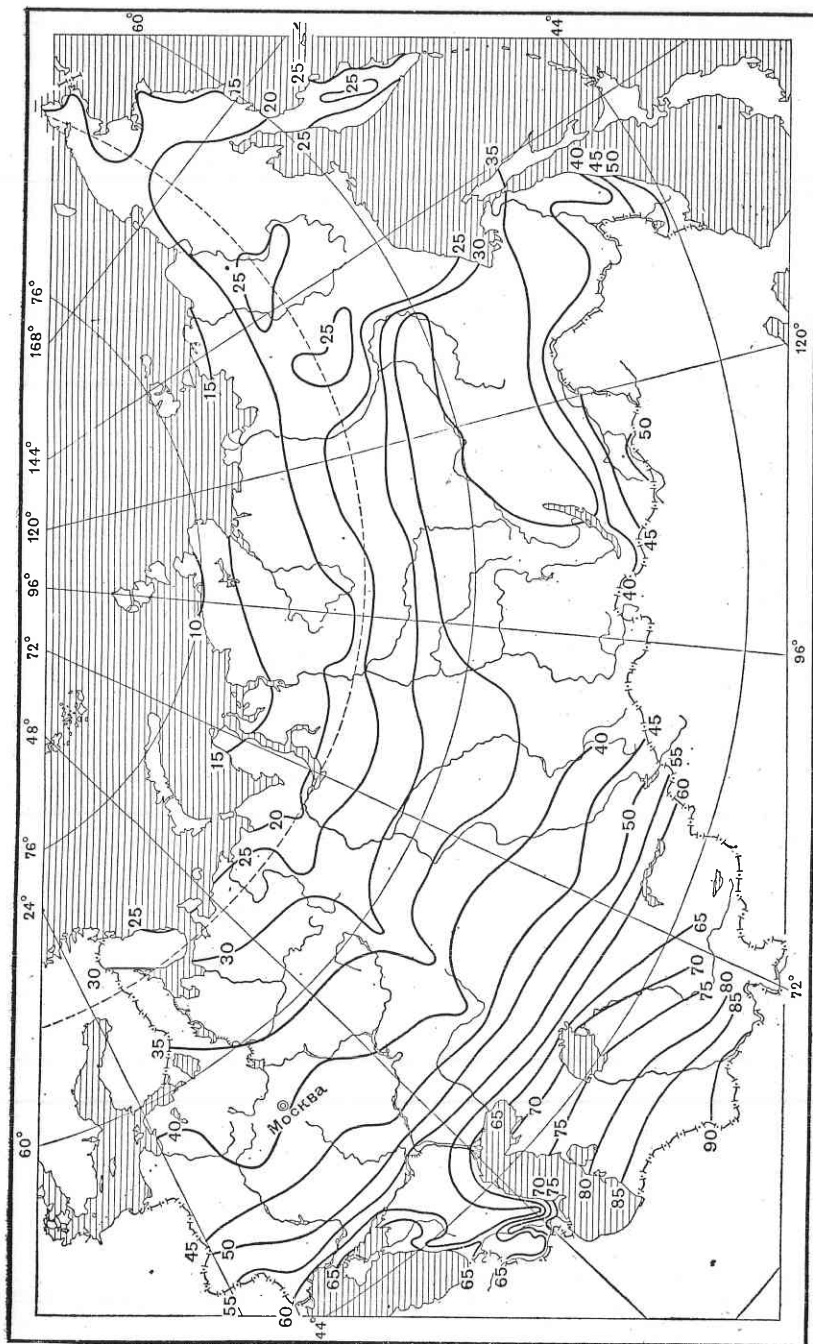


Рис. 43. Радиационный баланс увлажненной поверхности $B_0 \frac{\text{к кал}}{\text{см}^2 \cdot 200}$.

скорости ветра со значениями температуры и влажности воздуха, измеренными на метеорологических станциях. Пользуясь полученными зависимостями и уравнением (230), А. Р. Константинов разработал расчетные графики для определения суточного хода испарения по срочным значениям температуры и влажности воздуха, измеренным на метеостанции.

Средние многолетние месячные величины испарения в соответствии с этой методикой определяют по выражению:

$$\bar{E}_{\text{мес}} = n E_{\text{сут}}, \quad (231)$$

где n — число суток в месяце;

$E_{\text{сут}}$ — интенсивность испарения за сутки в миллиметрах.

Величину $E_{\text{сут}}$ находят по таблице, приведенной в технических указаниях, в зависимости от средних за месяц температуры ($t_{\text{изм}}$) и влажности воздуха ($e_{\text{изм}}$). Предварительно в значения среднемесячной температуры $t_{\text{изм}}$ и влажности воздуха $e_{\text{изм}}$, выбранных из климатологического справочника, вносят поправки на сезонный ход температуры (Δt) и влажности (Δe). Значения поправок Δt и Δe определяют также по таблице, приводимой в технических указаниях.

Годовую норму суммарного испарения определяют суммированием месячных величин испарения.

Когда нет необходимости в расчетах месячных норм испарения, норму годового суммарного испарения можно определить непосредственно с помощью номограммы (рис. 44) по среднегодовым значениям температуры и влажности воздуха, вычисленным за многолетний период.

При определении испарения для значительных по размерам территорий (речных бассейнов) расчеты проводят по большому числу пунктов и обобщают данные по методу среднеарифметической или средневзвешенной величины, в зависимости от равномерности распределения пунктов (метеостанций).

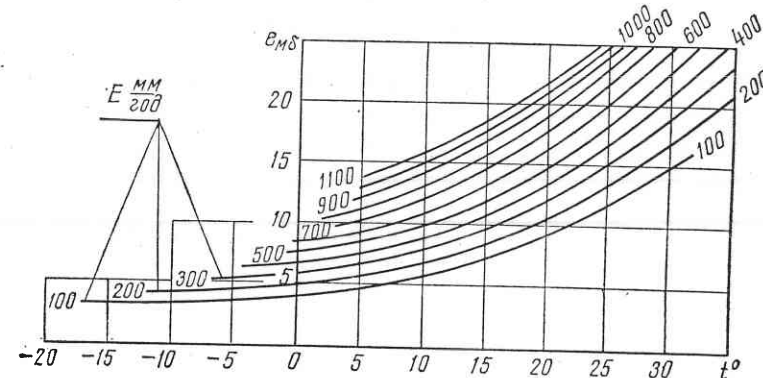


Рис. 44. Номограмма для вычисления среднего многолетнего годового испарения E по средней годовой температуре ($t^\circ \text{C}$) и влажности ($e \text{ мб}$) воздуха.

Метод А. Р. Константинова позволяет довольно просто установить суточный ход суммарного испарения, норму годового испарения и внутригодовое ее распределение. Техническими условиями рекомендуется применять этот метод для расчета испарения в районах избыточного и достаточного увлажнения.

Для оценки испарения с конкретных поверхностей суши (например, сельскохозяйственных культур и угодий) за отдельные месяцы конкретных лет используется метод теплового баланса и частично накопленные материалы наблюдений по почвенным испарителям ГГИ-500-50 и ГГИ-500-100.

Согласно методу теплового баланса, основанного на законе сохранения энергии, испарение равно

$$E = \frac{1}{60} (B - P - L), \quad (232)$$

где B — радиационный баланс;

P — теплообмен с почвой;

L — теплообмен с атмосферой.

В формуле (232) испарение E выражено в миллиметрах за известный промежуток времени, а B , P и L — кал/см² за тот же период. Число 60 в знаменателе выражает скрытую теплоту испарения, необходимую для перехода в пар 0,1 г воды.

Непосредственно измеряют лишь радиационный баланс B . Теплообмен в почве P и теплообмен с атмосферой L вычисляют с некоторым приближением по данным наблюдений над градиентом температуры соответственно в верхнем слое почвы и в нижнем слое воздуха.

Метод теплового баланса позволяет рассчитывать декадные и месячные суммы испарения конкретных лет с поверхности, покрытой невысокой растительностью, с точностью 10—15%. При помощи этого метода можно получить также суточный ход испарения. Однако широкое практическое применение метода теплового баланса для расчетов испарения требует дальнейшего развития и накопления данных метеорологических наблюдений, необходимых для вычисления составляющих уравнение элементов.

§ 3. Осадки

Водяные пары могут оставаться в воздухе до тех пор, пока количество их не достигнет стадии насыщения. Предел насыщения воздуха понижается при понижении температуры. Если массы воздуха с некоторым запасом водяных паров попадают в верхние слои атмосферы, где температуры значительно ниже наземных, создаются условия, при которых относительная влажность паров превышает предел насыщения. В этом случае дальнейшее охлаждение повлечет за собой образование пара, переход его в воду (или кристаллы льда) и выпадение осадков. Следовательно, образование осадков объясняется наличием восходящих токов воздуха. Подъем воздушных масс воздуха происходит главным образом вследствие сильного нагрева земной поверхности, прохождения

циклонов и встречи с горами. Осадки могут выпадать в виде дождя, снега и града. Кроме того, водяные пары выделяются непосредственно из воздуха на поверхности земли в виде росы, инея и изморози. Их количество невелико по сравнению с осадками.

В зависимости от характера выпадения различают ливневые, обложные и моросящие осадки.

Ливневые осадки образуются в результате быстрого подъема воздуха вверх и характеризуются большой интенсивностью, сравнительно малой продолжительностью и небольшой площадью распространения. В виде ливневых осадков может выпадать дождь, снег крупных хлопьев и град, а также большей частью крупа и мокрый снег.

Обложные осадки образуются в результате медленного восхождения теплого воздуха. Они характеризуются сравнительно небольшой интенсивностью, большой продолжительностью и значительной площадью распространения. Обложные осадки выпадают в виде дождя и снега.

Моросящие осадки состоят из мельчайших капель или крупинки снега, которые как бы взвешены в воздухе и очень медленно оседают.

Распределение осадков по поверхности суши зависит от расположения местности по отношению к океану, дающему основное количество влаги, от рельефа местности и в некоторой степени от растительного покрова. По мере удаления от океана количество осадков постепенно уменьшается. Так, на северо-западе и западе европейской части СССР выпадает в среднем 700 мм осадков в год, на юго-востоке — 300—400 мм, а в Средней Азии и пустынных районах — 100—150 мм.

В горных районах склоны, обращенные к влагоносным ветрам, получают больше осадков, чем противоположные склоны. В условиях европейской части СССР на западных склонах обычно выпадает больше осадков, чем на восточных, так как здесь преобладает перенос влаги с запада на восток; в условиях Дальнего Востока, наоборот, осадков больше выпадает на восточных и юго-восточных склонах горных хребтов, расположенных на пути влагоносных ветров.

Влияние рельефа сказывается и в том, что с повышением местности количество выпадающих осадков обычно увеличивается. Это объясняется тем, что возвышенности усиливают восходящие токи воздуха. Закономерность изменения осадков с высотой особенно резко проявляется в горных районах. Однако и на равнинных территориях влияние рельефа также заметно; даже на сравнительно небольших возвышенностях количество осадков увеличивается. Например, на Валдайской возвышенности средние годовые осадки возрастают на 100—150 мм по сравнению с расположенной рядом котловиной озера Ильмень. Увеличение осадков с высотой происходит до отметок 3000—3500 м над уровнем моря, а выше оно замедляется или прекращается. Наибольшее количество осадков — до 4000 мм выпадает в районе Поти — Батуми. Распределение осадков на территории СССР представлено картой изолиний (рис. 45).

Дожди с большой интенсивностью называются ливнями. Э. Ю. Берг предложил нормы минимальной интенсивности ливней в зависимости

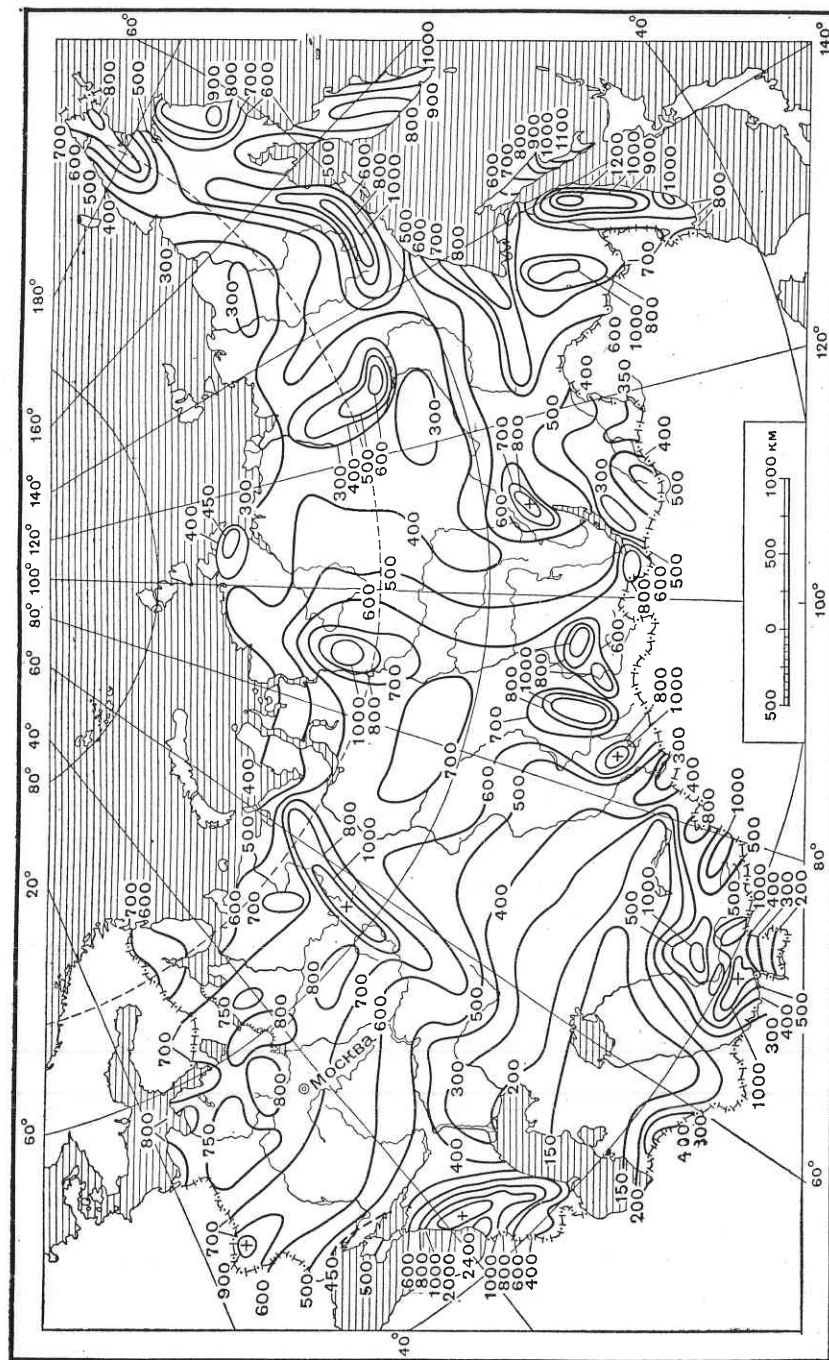


Рис. 45. Среднее годовое количество осадков, мм.

от их продолжительности (табл. 8). Если средняя интенсивность дождя за период выпадения превышает указанную в таблице 8 норму, то дождь считается ливневым, хотя такое определение является до некоторой степени условным.

Обычно на территории европейской части СССР и Западной Сибири продолжительность ливней не превышает 2 ч, но иногда они затягиваются. В районах Дальнего Востока наблюдаются ливни муссонного происхождения продолжительностью несколько суток. Такие же продолжительные ливни бывают и в районе влажных субтропиков (Поти — Батуми).

Ливни характеризуются тем, что интенсивность их быстро уменьшается с возрастанием продолжительности, а с увеличением интенсивности уменьшается площадь распространения ливня.

ТАБЛИЦА 8

Продолжительность ливня	Суммарное количество осадков, мм	Средняя интенсивность ливня, мм/м-сек
5 мин.	2,5	0,5
10 »	3,8	0,38
30 »	8,0	0,27
50 »	11,0	0,22
1 ч	12,0	0,20
6 »	45,0	0,06
24 »	60,0	0,004

Связь между интенсивностью ливня и его продолжительностью представляется некоторой гиперболической зависимостью.

Аналитически эта зависимость выражена эмпирической формулой З. П. Богомазовой и З. П. Петровой (см. главу VI).

Ливни играют важную роль в процессе формирования стока рек. Вследствие выпадения ливней на реках формируются дождевые паводки. Ввиду того что ливни имеют большую интенсивность, максимальные расходы дождевых паводков могут быть значительны, а на малых реках часто превышают максимальные расходы от снеготаяния.

Обложные дожди в отличие от ливней имеют малую интенсивность, но большую продолжительность и охватывают значительные площади. Поэтому обложные дожди дают большое количество стока. Паводки от обложных дождей более растянуты во времени, но максимальные расходы их меньше, чем от ливней.

Измерение дождевых осадков проводят в основном осадкомером В. Д. Третьякова (рис. 46). Этот прибор состоит из ведра с площадью приемной поверхности 200 см^2 . Ведро устанавливают на столбе так, чтобы верхний край его был на высоте 2 м от поверхности почвы. От выдувания осадков прибор защищен рядом металлических планок, скрепленных в нижней части цепочкой так, что все планки имеют наклон к плоскости горизонта. Верхний конец планки отогнут во внешнюю сторону.

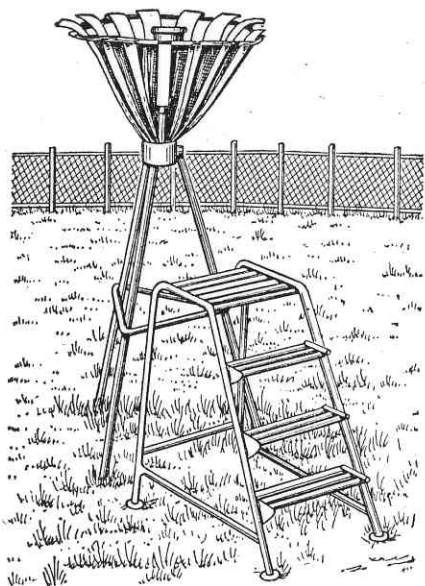


Рис. 46. Осадкомер В. Д. Третьякова.

методика расчета поправок к показаниям дождемера в зависимости от скорости ветра и температуры воздуха. Приближенные значения средних по районам и областям поправочных коэффициентов к нормам месячных и годовых величин осадков (по ГГО) изменяются в широких пределах (от 1,17 до 1,56).

Для непрерывной и автоматической записи количества жидких осадков применяют самопишущие дождемеры — плувиографы (рис. 47). Осадки попадают в дождемерное ведро площадью 500 см². Из дождемерного ведра вода стекает по трубке в цилиндрический сосуд с поплавком. К поплавку прикреплен стержень с пером, который соприкасается с лентой барабана, вращающегося с помощью часового механизма. При выпадении осадков поплавок поднимается, и вместе с ним движется по ленте перо, вычерчивая кривую изменения количества осадков. При заполнении цилиндрического сосуда доверху вода автоматически выливается из него через сифон и поплавок быстро опускается (перо в это время пишет нисходящую вертикальную линию). При отсутствии осадков перо вычерчивает на ленте горизонтальную линию.

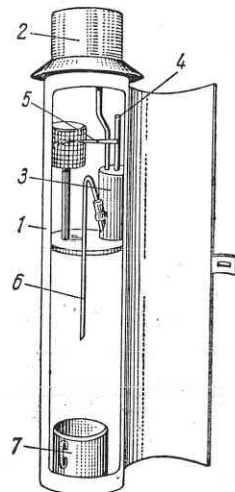


Рис. 47. Плувиограф: 1 — кожух; 2 — дождемерное ведро; 3 — сосуд; 4 — стержень с поплавком; 5 — перо самописца; 6 — сифон; 7 — приёмный сосуд.

В труднодоступных горных районах применяют суммарные дождемеры, собирающие осадки в течение длительного периода времени (месяц и больше).

Зимние осадки, выпадающие в виде снега и накапливающиеся за зиму в значительных количествах, играют весьма важную роль в гидрологических процессах.

Основными характеристиками снежного покрова являются: продолжительность залегания, высота, плотность снега, запасы воды в снеге.

Продолжительность залегания снежного покрова уменьшается с севера на юг. На побережье Северного Ледовитого океана она в среднем составляет 240—260 дней, а на юго-восточном побережье Каспийского моря снег лежит в среднем всего 3—4 дня. Продолжительность залегания снежного покрова увеличивается по мере продвижения с запада на восток. Так, на широте 60° на побережье Балтийского моря снег лежит около 80 дней, а на той же широте в Западной Сибири — 200 дней.

Высота снежного покрова в различных районах СССР неодинакова. Наибольшей высоты снежный покров достигает на западных склонах Северного Урала (до 100 см). Самый тонкий снежный покров (около 10 см) наблюдается в большинстве районов Среднеазиатских республик, на Северном Кавказе, в степных районах Украины. Мало снега выпадает также в степном Забайкалье и на территории Дальнего Востока.

В бассейне рек снежный покров залегает неравномерно. Степень неравномерности зависит от рельефа местности и характера растительности. Под влиянием ветра происходит перемещение снега: с одних мест он сдувается, а в других скапливается в виде сугробов. Чем больше изрезана местность, тем неравномернее распределяется снежный покров. На равнинах, расчлененных оврагами, долинами и балками, большая часть снега сносится ветрами в долины и овраги. Наиболее пестрое распределение снега наблюдается в горах.

На характер залегания снежного покрова влияет и растительный покров. Значительное скопление снега наблюдается в мелком кустарнике, у лесных опушек и в молодых лесных зарослях.

Плотность снега выражается отношением объема воды, образующейся при таянии определенного количества снега, к объему этого снега:

$$\delta_{\text{сн}} = \frac{G}{W}, \quad (233)$$

где $\delta_{\text{сн}}$ — плотность снега;

G — вес снега, г;

W — объем снега, см³.

Плотность свежеснежавшего снега в среднем равна 0,10. Лежалый снег имеет плотность 0,15—0,20. По мере увеличения высоты снежного покрова плотность снега увеличивается от давления верхних слоев на нижние. При максимальной толщине снежного покрова плотность его равна 0,25—0,30, а перед началом снеготаяния она достигает 0,35—0,40.

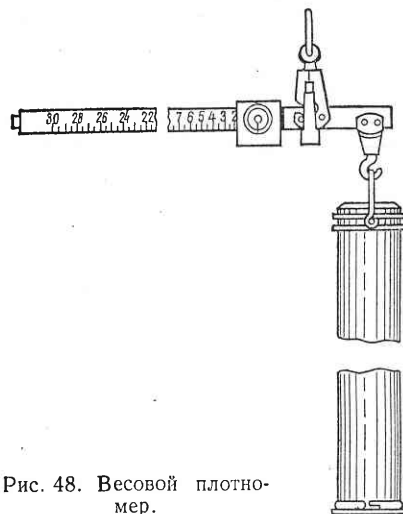


Рис. 48. Весовой плотномер.

От запасов воды в снеге (количества воды, образующейся от его таяния) зависит размер весеннего половодья, увлажнение почвы весной и т. д. Зная плотность снега $\delta_{\text{сн}}$ и высоту снежного покрова $h_{\text{сн}}$, можно получить соответствующий этой высоте слой воды:

$$h_{\text{в}} = \delta_{\text{сн}} h_{\text{сн}}. \quad (234)$$

Для определения запасов воды в снеге на водосборе проводят снегомерные съемки: замеряют высоту снежного покрова и его плотность в различных точках бассейна. По данным этих съемок получают распределение высот снежного покрова, его плотности и запасов воды в снеге в виде изолиний.

Измерение зимних осадков. Высоту снежного покрова определяют снегомерными рейками (постоянными и переносными). Плотность снега определяют весовым снегомером или плотномером (рис. 48). Этот прибор состоит из металлического градуированного цилиндра площадью 50 см^2 и весов — безмена с делениями через 5 г. При взятии пробы цилиндр погружают в снег до поверхности земли и по его шкале отсчитывают высоту снежного покрова. Затем пробу взвешивают и вычисляют плотность:

$$\delta_{\text{сн}} = \frac{5n}{50h_{\text{сн}}} = \frac{n}{10h_{\text{сн}}}, \quad (235)$$

где n — число делений на безмене;

$h_{\text{сн}}$ — высота снежного покрова.

В соответствии с выражением (234) запас воды в снеге равен:

$$h_{\text{в}} = \delta_{\text{сн}} h_{\text{сн}} = \frac{nh_{\text{сн}}}{10h_{\text{сн}}} = 0,1n. \quad (236)$$

Для измерения количества зимних осадков применяют также осадкомеры системы В. Д. Третьякова, однако точность учета твердых осадков (снега) этими приборами ниже, чем при измерении жидких осадков.

В 1965—1968 гг. в Валдайской научно-исследовательской лаборатории ГГИ разработан и испытан в полевых условиях походный радиоэлектронный снегомер (М-100), предназначенный для производства маршрутных снегомерных съемок.

В отличие от метода обычных снегомерных измерение запасов воды в снеге прибором М-100 производится не в отдельных точках снегомерной линии, а непрерывно по длине маршрута в полосе шириной 8—10 м.

Определение среднего количества осадков для бассейна реки. Данные наблюдений за осадками получают непосредственно с метеорологических станций в виде месячных табличных сводок. В зависимости от густоты метеостанций и требуемой точности слой осадков для изучаемого бассейна за тот или иной период времени можно вычислить одним из следующих способов: изогией, квадратов, взвешенных площадей или средней арифметической.

1. **Способ изогий** (линий равных осадков) состоит в том, что на карту бассейна наносят все метеорологические станции и выписывают количество осадков на каждой из них. По этим данным проводят изогии. Планиметром определяют площади между изогиями (ω_i) и устанавливают путем интерполяции между соседними изогиями количество осадков для центров тяжести площадок (x_i). При равномерном распределении изогий x_i можно определить как полусумму двух изогий. Среднее количество осадков для всего бассейна находят как средневзвешенную величину:

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_1\omega_1 + x_2\omega_2 + \dots + x_n\omega_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}. \quad (237)$$

Способ изогий применяют при детальном расчете количества осадков в условиях достаточно густой сети станций.

2. **Способ квадратов** заключается в том, что площадь бассейна делят на ряд равновеликих квадратов. Для каждого квадрата вычисляют слой осадков как среднее арифметическое из показаний станций, попадающих на площадь квадрата, или интерполяцией между смежными квадратами, если на квадрат не попала ни одна станция. Полученные величины осадков относят к центрам квадратов и выписывают в них. Суммируя количество осадков всех квадратов и деля результат на число квадратов (n), получают слой осадков для всего бассейна:

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (238)$$

Способ квадратов более прост, чем предыдущий, и для больших бассейнов дает довольно точные результаты.

3. **Способ взвешенных площадей** применяют в том случае, когда на бассейне имеется небольшое количество метеостанций и провести изогии нельзя. Тогда на одной половине расстояния между станциями (например, № 1 и 2) принимают значение осадков станции № 1, на второй — величину осадков станции № 2.

Расчет по способу средневзвешенных площадей производится так. На карту бассейна наносят все станции данного бассейна и соседние, соединяют их прямыми линиями. Образуется сеть треугольников (рис. 49). Из середины стороны каждого треугольника проводят перпендикуляры до их взаимного пересечения. Точки пересечений опре-

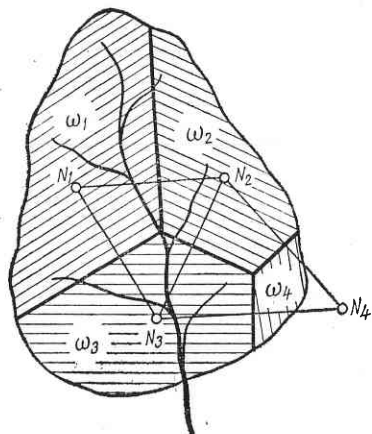


Рис. 49. Схема к вычислению среднего количества осадков методом средневзвешенных площадей.

способе суммируют значения слоя осадков, зарегистрированных на всех метеорологических станциях, расположенных в пределах бассейна, и полученную сумму делят на число станций.

§ 4. Климатические факторы и годовой сток

Соотношение между климатическими факторами и стоком для годового цикла и многолетнего периода выражается уравнениями водного баланса речного бассейна, рассмотренными в главе III.

Уравнение водного баланса речного бассейна в многолетнем разрезе имеет вид:

$$y_0 = x_0 - E_0.$$

Отсюда видно, что если осадков нет, то нет и стока. Если есть осадки, но происходит сильное испарение, — сток незначителен. При большом количестве осадков и малом испарении сток наибольший.

Рассмотрим типовые соотношения между годовыми осадками, стоком и испарением. Максимальное возможное испарение $E_{\max}$ — это наибольшая величина, которой испарение достигает при данных метеорологических условиях, то есть при наличии влаги и благоприятных физических условий. Количество влаги стоит в прямой связи с количеством выпадающих осадков при прочих равных условиях. Если осадков мало, то и испарение слабее. С увеличением осадков испарение увеличивается сначала быстро, а потом постепенно замедляясь. Когда осадки превышают количество, достаточное для максимального испарения, величина последнего уже не увеличивается, а остается постоянной.

Э. М. Ольдекоп выразил зависимость испарения от осадков уравнением (227), из которого следует, что единственным параметром кривой

деляют границы участков, тяготеющих к данной станции. Определив эти площади планиметром, вычисляют среднее количество осадков для бассейна реки по выражению:

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad (239)$$

где x_i — осадки каждой станции;
 ω_i — площадь бассейна, тяготеющая к данной станции.

4. Способ средней арифметической является наиболее простым и применяется для предварительных расчетов или в случае достаточно однородного равнинного рельефа при наличии густой сети метеорологических станций. При этом

испарения является $E_{\max}$. Поэтому при разных значениях $E_{\max}$ получается семейство кривых испарения, выходящих из начала координат (рис. 50). В начале выпадения осадков все их количество, вероятно, должно поглощаться испарением. Поэтому вначале угол наклона кривых испарения близок к 45° . Когда фактическое испарение достигает максимального возможного значения ($E_{\max}$), угол наклона кривой испарения к оси абсцисс равен нулю (испарение остается постоянным, хотя осадки увеличиваются).

По мере увеличения осадков сток возрастает, но медленно. Затем, когда фактическое испарение приближается к возможному, быстрее. И наконец, при больших значениях осадков кривая стока идет под углом 45° к оси абсцисс, то есть все выпадающие осадки стекают, так как испарение достигло уже своего максимума. Таким образом, теоретическая кривая стока (в отличие от теоретической кривой испарения) вначале имеет угол наклона, близкий 0° , а в пределе, при больших значениях осадков, — 45° .

В результате анализа фактических данных годовых осадков, стока и испарения установлено, что соотношение между ними может быть в основном трех типов.

К первому типу относится резко выраженная зависимость стока от осадков, то есть с увеличением осадков сток интенсивно увеличивается. Испарение при этом изменяется мало (рис. 51, а). Такие соотношения наблюдаются в условиях влажного, холодного климата.

Ко второму типу относится резко выраженная зависимость испарения от осадков (то есть интенсивное изменение испарения) при малой зависимости стока от осадков (рис. 51, б). Такое явление наблюдается при благоприятных условиях для испарения.

К третьему типу относятся достаточно выраженные зависимости от осадков как испарения, так и стока; сток и испарение возрастают

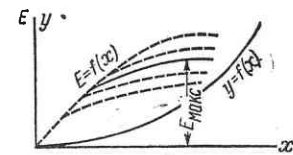


Рис. 50. Кривые испарения по Ольдекопу и кривая стока.

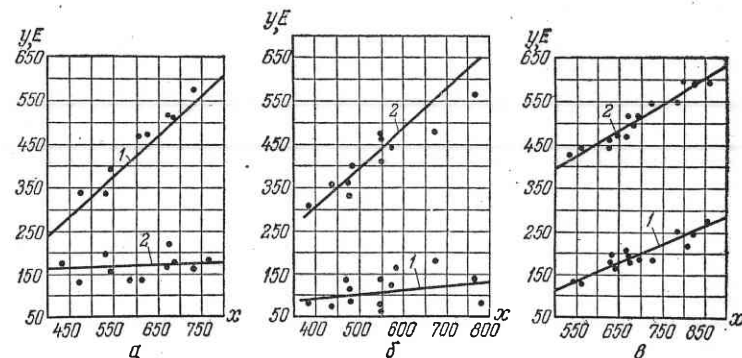


Рис. 51. Типовые соотношения между осадками, стоком и испарением: а — 1-й тип; б — 2-й тип; в — 3-й тип; 1 — сток; 2 — испарение.

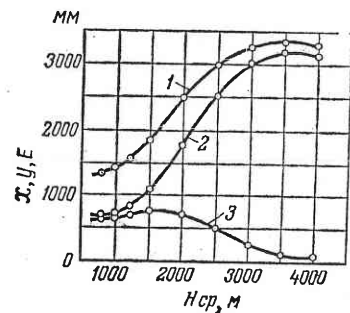


Рис. 52. Зависимость осадков, стока и испарения от высоты водосбора:

1 — осадки; 2 — сток; 3 — испарение.

больше. Кроме того, на сток текущего года оказывают влияние осадки предыдущего года (или нескольких лет).

Влияние на годовой сток температуры воздуха и других климатических элементов. На характер связи годовых значений стока и осадков оказывают влияние условия просачивания и стекания осадков по поверхности водосбора, подземное накопление и расходование влаги, а также другие климатические факторы (кроме осадков).

Выпадение того или иного количества осадков связано с температурой, влажностью воздуха, давлением воздуха, ветром, испарением. Причем в разных районах при одинаковом количестве осадков в двух бассейнах испарение может быть различным, следовательно, и сток будет различным.

Важный фактор, влияющий на процессы стока, — дефицит влажности, который определяет величину потерь осадков на испарение.

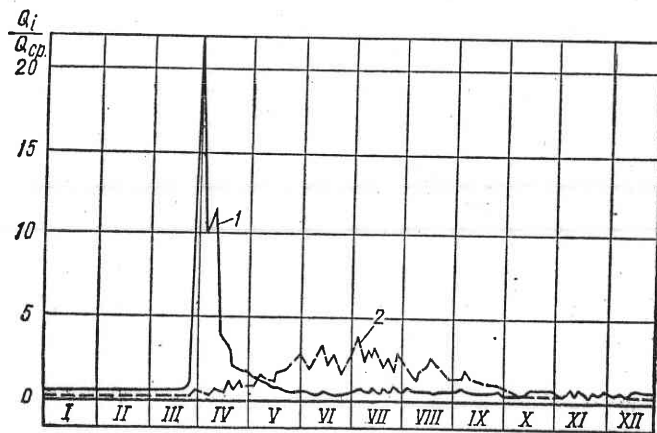


Рис. 53. Гидрограф р. Вахш и р. Дон:

1 — р. Дон, с. Гремяче, 1916 г.; 2 — р. Вахш, ст. Туткуальская, 1936 г.

примерно с одинаковой интенсивностью, образуя две почти параллельные прямые (рис. 51, в).

В действительности может быть много других промежуточных соотношений, более близких то к одному, то к другому или третьему из указанных характерных случаев. Это объясняется тем, что связь между годовым стоком и осадками является приближенной, так как величина стока зависит не только от количества выпавших осадков, но и от их характера. Если осадки выпали зимой, большая часть их может попасть в реку. Если осадки выпали летом, то процент потерь их будет значительно

Дефицит влажности зависит от абсолютной влажности и температуры воздуха. Отрицательные температуры обуславливают выпадение осадков в твердом виде. Положительная температура зимой вызывает таяние снега и появление поверхностного стока, в результате чего уменьшается сток весеннего половодья. Высокие температуры воздуха весной и в летне-осенний период увеличивают потери выпадающих осадков на испарение.

Таким образом, ход температур воздуха непосредственно влияет на величину и процессы стока, особенно на сток рек, берущих свое начало с ледников или гор с мощным снеговым покровом.

К числу второстепенных климатических факторов, влияющих на сток, можно отнести ветер, сказывающийся на процессах испарения и давления воздуха. Резкое уменьшение давления часто вызывает увеличение притока грунтовых вод.

Особенности формирования стока горных рек. С ростом абсолютной высоты местности в горных районах количество осадков возрастает.

В тесной связи с высотой местности находится и температура воздуха. Понижение температуры с высотой вызывает увеличение твердых осадков (снега) по отношению к их общему количеству. Кроме того, резкое понижение температур с ростом высоты приводит к уменьшению дефицита влажности. В результате этого существенно уменьшается величина испарения. Увеличение осадков и уменьшение испарения с высотой приводит к тому, что сток в горных реках существенно повышается с ростом абсолютной высоты водосбора. Характерные зависимости осадков, стока и испарения от средневзвешенной высоты водосбора показаны на рисунке 52. Как видно из рисунка, на высоте примерно 3500 м увеличение осадков и стока прекращается.

Основным фактором, определяющим водоносность горных рек, является количество твердых осадков, аккумулированных в горах за холодный период года. Таяние снега и льда в горных районах происходит не одновременно на всей площади водосбора реки, а постепенно перемещаясь от более низких отметок рельефа к более высоким. Поэтому половодье на горных реках растянуто во времени и не имеет резких пиков. На рисунке 53 приведен гидрограф горной реки (1) и для сравнения гидрограф равнинной (2).

Для горных рек часто получаются хорошие связи между расходами и температурами: с ростом положительных температур расход реки возрастает (рис. 54).

На реках, которые берут начало с низких ярусов гор, под влиянием интенсивных дождей или интенсивного снеготаяния формируются так называемые сели — паводки с резким подъемом и спадом, несущие огромное количество камней и наносов, смытых с крутых склонов гор.

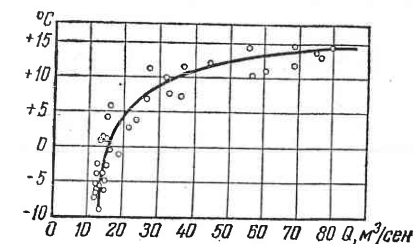


Рис. 54. Связь между декадными расходами и температурами воздуха для одной из горных рек.

ЧАСТЬ II. РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

Глава I. ЗАДАЧИ И ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

§ 1. Понятие о регулировании стока

В нашей стране осуществляется грандиозный план мелиорации. Крупные оросительные системы строятся на Северном Кавказе, на Украине, в Заволжье и республиках Средней Азии. Сельское хозяйство становится крупнейшим потребителем воды. Одновременно с заборм больших объемов воды на орошение увеличивается водопотребление в связи с ростом населения и экономики страны.

Основным источником для удовлетворения возникающей потребности служат водные ресурсы (сток рек). Однако наиболее полному и рациональному использованию речного стока препятствуют значительные годовые и многолетние колебания водности рек. Базировать обеспечение водой различных отраслей народного хозяйства на естественном резко изменчивом стоке можно лишь в очень ограниченных пределах.

Различают забор воды (из естественных или искусственных водоемов) на водопотребление и водопользование. При водопотреблении вода идет на нужды потребителя: орошение, обводнение, промышленность, коммунальное водоснабжение, теплоэнергетику. При водопользовании вода служит для целей энергетики, речного судоходства, лесосплава.

Естественный режим речного стока не совпадает во времени с требованиями, предъявляемыми различными отраслями народного хозяйства. Синхронность, или совпадение по времени, повышенного стока и наибольшего оросительного водопотребления в году бывает только на реках с половодьем в теплый период.

Более полное использование речного стока в экономически перспективных районах Советского Союза становится первоочередной проблемой развития многих отраслей народного хозяйства.

Каждая отрасль хозяйства имеет свои специфические особенности (технологии, цикличность производственных процессов), и отнесение ее к водопользователям или водопотребителям не всегда определено.

Чтобы повысить использование существующих ресурсов стока рек, приспособить их режим к производственному режиму отдачи, необходимо регулировать речной сток водохранилищами.

Регулированием стока называется искусственное перераспределение естественного, как правило, неравномерного стока (прито-

ка) в соответствии с режимом водопотребления и водопользования. Регулирование стока проводится для различных целей, для разных отрезков времени, в неоднородных климатических зонах и природных условиях.

Если приток реки превышает отдачу, избытки аккумулируются в создаваемых емкостях (водохранилищах). В период, когда расход реки меньше отдачи, происходит опорожнение водохранилища или его сработка. Отдачей называется забор воды из водохранилища на полезные цели.

Регулирование стока рек является основным техническим приемом, позволяющим не только использовать водные ресурсы или приспособить их к планируемой отдаче, но и бороться с наводнениями и селевыми потоками.

Часто возможность полного перераспределения речного стока ограничена экономическими и физическими условиями.

Решающими критериями для оценки эффективности водохозяйственных мероприятий служат технико-экономические показатели, коэффициент эффективности, срок окупаемости, стоимость 1 м³ свежей пресной воды, забираемой из источника, и т. д.

Природные условия (гидрология, топография, геология и гидрогеология) иногда не позволяют создать емкости, достаточные для обеспечения требуемой отдачи, или собрать нужное количество воды вследствие недостатка стока или больших потерь.

Основным регулятором стока служат водохранилища, строительство которых имеет не только водохозяйственное, но и большое народнохозяйственное значение. Все больше рек становится зарегулированными, и иногда они превращаются в каскады водохранилищ. Но при их проектировании возникает ряд сложных правовых и экономических вопросов, связанных с затоплением, подтоплением территорий, переработкой берегов.

Создание на реках крупных водохранилищ вносит резкие изменения в режим поверхностного и подземного стоков, в природу окружающих территорий, влияет на условия хозяйственной деятельности человека, затрагивает интересы многочисленных организаций и ведомств.

Осуществление мероприятий по использованию речного стока на огромных территориях требует тщательного учета всех обстоятельств, связанных с экономической целесообразностью регулирования и оценкой его последствий.

Учеными нашей страны внесен крупнейший вклад в создание современной теории и методики расчетов регулирования и комплексного использования стока.

Теория регулирования и использования стока включает условия его регулирования, методику расчета и методику реализации планов.

К условиям регулирования стока относятся следующие основные вопросы.

1. Методика оценки водных ресурсов (вычисление речного стока) будущей эксплуатации водохранилища с учетом изменений естественного режима стока в результате деятельности человека. Для различных

периодов эксплуатации характеристики стока (притока) меняются. Данная часть расчетов представляет гидрологическую основу регулирования стока.

2. Требования, предъявляемые водопотребителями и водопользователями в отношении сроков, объемов и бесперебойности отдачи. Планируемая отдача (потребность в воде) учитывает изменения технологии производства и направления хозяйства на перспективный уровень развития экономики. При оросительном водопотреблении устанавливается связь с сельскохозяйственной мелиорацией — основным участником комплекса обслуживаемых потребителей.

3. Определение нормы потерь воды из водохранилища в зависимости от природных особенностей района строительства, режима водохозяйственной установки и гидротехнических мероприятий, проведенных в процессе строительства. Так как суммарные потери связаны с параметрами водохранилища и обуславливаются технологией процесса регулирования, их часто рассматривают как водопотребление.

4. Характеристика начальных условий (накопление воды в водохранилище к началу эксплуатации).

Условия регулирования являются общими исходными предпосылками при расчетах.

Методика расчетов регулирования стока — основной раздел в теории его регулирования и использования.

Разнообразие типов задач, возникающих при проектировании и эксплуатации водохозяйственных сооружений, различное сочетание местных условий, а также конструкций и типов регулирующих сооружений, различный подход ученых к решению задач обусловили наличие нескольких методик расчетов, основные из которых кратко излагаются в курсе.

Расчет регулирования стока сводится или к определению параметров водохранилища и правил регулирования, обеспечивающих планируемую отдачу и рациональное использование стока, или, наоборот, к получению последних при заданных вариантах параметров и правил регулирования.

Если водохранилище обслуживает гидроэлектростанцию и имеет энергетическое назначение, определение варианта или результатов регулирования проводится с помощью водозенергетических расчетов. Особенности этой методики в сочетании с общей методикой расчетов регулирования излагаются в курсах использования водной энергии.

По А. Д. Саваренскому, перед расчетом задаются варианты регулирования, включающие параметры водохранилища, площади орошения и правила регулирования. В результате расчета определяют полезную отдачу воды, наполнение водохранилища, сбросы.

Методика реализации планов регулирования стока связана с особенностями расчетов в условиях эксплуатации, когда параметры водохранилища известны и требуется установить при различных вариантах правил регулирования их результаты. Ввиду ограниченного объема учебного пособия основы методики расчетов регулирования стока, применяемые при проектировании, изложены весьма кратко.

§ 2. Виды регулирования стока

Классификация видов регулирования дается по следующим признакам: назначению, продолжительности, степени использования стока, группированию водохранилищ относительно друг друга, эксплуатационным и другим показателям.

Водохранилища, наполняемые стоком в многоводные периоды для его использования в маловодные периоды, называются запасными. Методика расчета таких водохранилищ подчинена задаче обеспечить бесперебойное снабжение водой обслуживаемых систем и предприятий.

В практике регулирования стока водохранилища обслуживают различные отрасли хозяйства: орошение, гидроэнергетику, речное судоходство и лесосплав, водоснабжение городов и поселков, водоснабжение промышленное, теплоэнергетику, рыбное хозяйство.

Такая градация обусловлена особенностями расчетов регулирования. Рассмотрим основные признаки регулирования стока по назначению обслуживаемых отраслей хозяйства.

Орошение. График оросительного водопотребления отличается сезонной неравномерностью, лимитирующим сезоном года (лето — осень или весна). Лимитирующим называется наиболее неблагоприятный по соотношению между стоком и отдачей маловодный сезон года.

При определении емкости водохранилища суточная неравномерность водопотребления при орошении обычно не принимается в расчет. Расчет ведут на постоянную отдачу для засушливых районов и переменную в зонах неустойчивого увлажнения в зависимости от водности года.

Возвратные воды коллекторно-дренажной сети нуждаются в разбавлении и без последнего повторно не используются. При орошении требуется подача значительных объемов воды на единицу площади в ограниченные сроки.

Гидроэнергетика. Искомые величинами в этом случае являются мощность и энергоотдача, которые определяются водозенергетическими расчетами и зависят от расходов и напоров воды на ГЭС. Режим работы гидроэлектростанций неравномерен ввиду колебаний потребности в электроэнергии в различные периоды года, недели, суток.

На изолированно работающей ГЭС неблагоприятное соотношение между отдачей выработки электроэнергии и речным стоком наблюдается обычно в зимний период. При расчетах учитывается суточная и недельная неравномерность требований.

Речное судоходство и лесосплав проводятся при свободном состоянии русла в период навигации.

При использовании реки в транспортных целях учитывают скорости течения, глубину, ширину, ветровое волнение на судоходной трассе и в пределах водохранилища. Лимитирующий сезон обычно летне-осенний. Водный транспорт нередко ухудшает качество воды в водохранилище. Устройство крупных водохранилищ изменяет условия речного транспорта и лесосплава. На отдельных реках практикуют пуски воды из водохранилищ.

Коммунальное водоснабжение. Для питьевого водоснабжения применяется чистая пресная вода, отвечающая техническим условиям и требованиям государственных стандартов.

График водопотребления в течение года при водоснабжении более или менее равномерен. Летом потребление воды увеличивается (около 1,1 от среднегодового), зимой уменьшается. Водоснабжение колхозов и совхозов при наличии предприятий перерабатывающей промышленности имеет сезонную неравномерность. В течение суток и недели их водопотребление неравномерно. Соблюдается специальный санитарный режим водохранилища.

Водоснабжение промышленных предприятий и тепловых электростанций. Режим водопотребления отличается суточной и недельной неравномерностью. На тепловых станциях вода используется на охлаждающие цели, гидротранспорт золы и смену воды в котлах. Необходимые объем и качество забираемой воды определяются технологией производства.

Промышленные стоки являются основным источником загрязнения водоемов, наносят ущерб рыбному хозяйству, сокращают ресурсы пресных чистых вод и требуют очистки. Меры по борьбе с загрязнением рек и водохранилищ имеют большое народнохозяйственное значение и являются одной из крупнейших проблем современности. Сброс тепловыми электростанциями в реки условно чистой воды с повышенной температурой создает «тепловое загрязнение».

Рыбное хозяйство. Для обеспечения прохода рыбы к местам нереста предъявляются основные требования к режиму глубин и скоростей течения зимой или весной в зависимости от времени нереста. При прудовом хозяйстве вода нужна для поддержания проточности рыбных и нагульных прудов. Рыбохозяйственное освоение водохранилищ предусматривает проведение специальных работ по очистке их ложа и т. д.

Комплексное регулирование стока. Если водохранилище обслуживает ряд отраслей хозяйства и одновременно регулирует сток половодий (паводков), оно имеет комплексное назначение.

Регулирование стока проводится и в целях борьбы с наводнениями и снижения стоимости сбросных сооружений. Регулирование половодий и паводков осуществляется противопаводочными или задерживающими водохранилищами.

По продолжительности периода различают следующие виды регулирования стока: суточное, недельное, краткосрочное, сезонно-годовое, многолетнее. При суточном и недельном регулированиях более или менее равномерный сток перераспределяется в неравномерную отдачу, то есть производится обратное регулирование.

Суточное регулирование стока (рис. 55) позволяет увеличить количество потребителей за счет использования накопленной воды в часы пониженного водопотребления и значительно снизить стоимость водопроводящих и водозаборных сооружений.

Водохранилище суточного регулирования завершает цикл работы (наполнение и сработка) в течение суток. При водоснабжении приме-

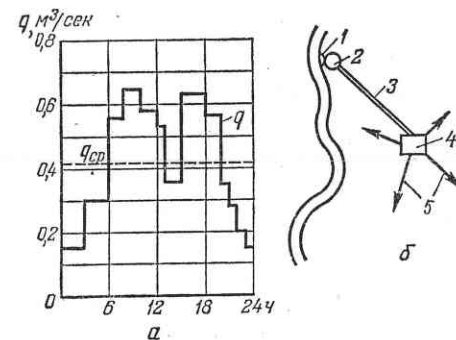


Рис. 55. Суточное регулирование стока: а — график водопотребления; б — схема размещения резервуара суточного регулирования; 1 — водозаборное сооружение; 2 — насосная станция; 3 — магистральный канал; 4 — резервуар суточного регулирования; 5 — сеть.

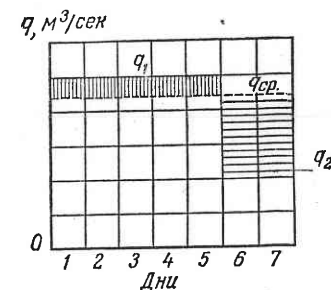


Рис. 56. Недельное регулирование стока.

няют бассейны суточного регулирования, а для их наполнения используют насосные установки.

Резкие колебания расходов в реке ниже по течению, вызванные суточным регулированием стока, отрицательно сказываются на речном транспорте и процессах формирования русла.

Недельное регулирование (рис. 56) применяется при наличии общих выходных дней. Водохранилище недельного регулирования задерживает избыточный сток за выходные дни, в которые потребление воды меньше, чем в рабочие. За счет этого повышаются расходы потребителей в рабочие дни.

Полный цикл работы водохранилища (сработка и накопление) составляет неделю.

Краткосрочное непериодическое регулирование стока применяется на малых реках. Попуски воды из водохранилищ проводят для увели-

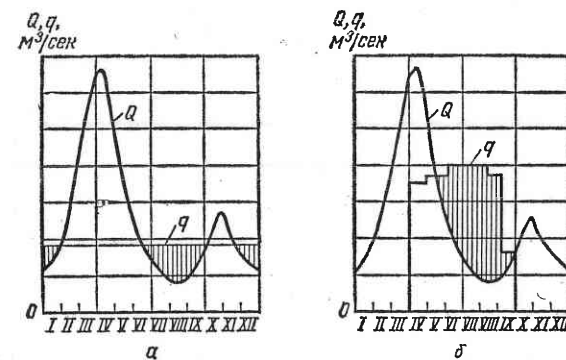


Рис. 57. Сезонно-годовое регулирование стока: а — на равномерную непрерывную отдачу; б — на неравномерную прерывную отдачу.

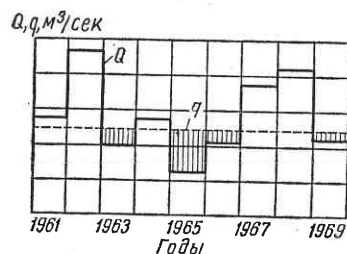


Рис. 58. Многолетнее регулирование стока.

В многоводные годы излишек воды сбрасывается из водохранилища в нижний бьеф; в исключительно маловодные годы бывают дефициты отдачи.

Многолетнее регулирование (рис. 58) — наиболее полный и совершенный вид регулирования стока. Перераспределение стока распространяется на весь период регулирования, состоящий из ряда лет.

В многоводные годы емкость водохранилища заполняется, в маловодные — срабатывается. Многолетнее регулирование стока требует создания емких водохранилищ.

При смешанном регулировании стока водохранилище высшего порядка используется для регулирования стока за более короткие отрезки времени. Многолетнее регулирование стока обеспечивает одновременно сезонно-годовое, недельное и суточное регулирование. Водохранилище сезонно-годового регулирования попутно может перераспределять сток за неделю и сутки.

Классификацию по эксплуатационным признакам для сезонного и многолетнего регулирования предложил П.А. Ляпичев. Эта классификация включает 12 видов сезонно-годового и многолетнего регулирования и исходит из стремления к рационализации использования избыточного стока и обеспечения гарантированной постоянной отдачи (простое регулирование на гарантированную отдачу, на максимальную отдачу, на переменные отдачи, сложное диспетчерское и т. д.). При системе нескольких водохранилищ регулирование стока подразделяется на каскадное и веерное. Различают компенсирующее регулирование и буферное.

Компенсирующее регулирование в простом случае обеспечивается двумя установками: верхняя имеет водохранилище, а нижняя осуществляет подачу воды потребителю. Компенсирующее регулирование ликвидирует дефицит незарегулированного стока между установками до величины отдачи за счет пусков из водохранилища.

Буферное регулирование осуществляют водохранилища относительно небольшой емкости. Такое регулирование предназначено для устранения возможных просчетов в пусках воды из вышерасположенного водохранилища, для компенсации дефицитов отдачи в створе водозабора.

чения глубин, необходимых при лесосплаве, судоходстве, при промывке скоплений и загрязнений, организации культурного отдыха и спортивно-оздоровительных мероприятий. Попуски из водохранилищ проводят и в санитарных целях.

Сезонно-годовое регулирование стока (рис. 57). Водохранилища перераспределяют приток воды по реке в течение года или сезона. Период работы водохранилища (цикл накопления и сработка) заканчивается за сезон или год.

По мере все большего использования естественного стока и его зарегулирования возникает ряд новых задач и расширяется типизация видов регулирования стока.

§ 3. Расчетная обеспеченность при регулировании стока

В практике расчетов широко применяют методы математической статистики. При этом многолетние колебания максимальных, средних и минимальных величин стока, осадков, испарения, скорости ветра, мутности и т. д. изображают кривыми обеспеченности, построение которых ведут различными способами. Чаще всего при построении кривых обеспеченности используют многолетние данные наблюдений за прошлый период с необходимой корректировкой их на основе прогноза будущих изменений природных условий.

Эмпирические и теоретические кривые обеспеченности характеризуют изменчивость искомых величин. Обеспеченность в общем виде представляет отношение числа случаев, при которых искомая величина превышает заданную или равна ей, к общему числу величин рассматриваемого ряда.

При проектировании водохозяйственных объектов различного назначения введено понятие расчетной обеспеченности в качестве критерия надежности определения искомой величины, изменяющейся во времени. Назначением расчетной обеспеченности устанавливаются верхние или нижние пределы допустимости превышения величины в условиях эксплуатации. Расчетная обеспеченность как критерий надежности выбора искомой величины имеет при проектировании двойное значение.

При проектировании водосбросных сооружений или дамб обвалования расчетная обеспеченность служит верхним пределом превышения максимальных расходов; за этим пределом (в сторону меньшего процента обеспеченности) возможны разрушения этих сооружений.

При расчете минимальных и средних годовых расходов воды, а также внутригодового распределения стока в качестве критерия надежности их определения принимается также ежегодная обеспеченность, как вероятность превышения этих величин.

Расчетная ежегодная обеспеченность ограничивается снизу допустимым пределом превышения расходов. Увеличение процента ежегодной обеспеченности связано с уменьшением расходов и снижением степени использования водных ресурсов.

В условиях регулирования стока увеличение процента обеспеченности отдачи требует создания водохранилищ большей емкости. Расчетная обеспеченность отдачи иногда характеризуется в процентах как вероятность бесперебойных лет, в течение которых потребители удовлетворяются водой полностью без перерыва. В соответствии с этим назначены нормативные проценты обеспеченности.

Согласно СН 371—67, обеспеченность гарантированной отдачи нормируется в зависимости от вида потребителя и степени допустимости

перебоев в ее подаче за лимитирующий период для различных районов и температурных условий.

Диапазон нормативных значений расчетной обеспеченности отдачи для лимитирующих периодов года принимается по таблице 1.

ТАБЛИЦА 1

Требуемая степень бесперебойной отдачи	Расчетная обеспеченность, р %
Недопустим перерыв или уменьшение отдачи	90—97
Недопустим перерыв, но возможно кратковременное (определяемое технологическими условиями работы) снижение подачи воды для промышленных предприятий:	
а) металлургических, нефтеперерабатывающих химических, для хозяйственно питьевых водопроводов	90—95
б) угольных, горнорудных, нефтедобывающих, машиностроительных и др.	85—90
Допустим кратковременный перерыв и уменьшение подачи воды	75—80
Теплоэлектростанции	85—95
Гидроэлектростанции	85—90
Орошение	80—85

Нормативная ежегодная расчетная обеспеченность отдачи при орошении приведена в таблице для районов недостаточного увлажнения. Более полная градация расчетной ежегодной обеспеченности отдачи воды внутри групп водопользователей и водопотребителей принимается согласно нормам СН 346—66.

Расчетная обеспеченность связывает размеры полезной отдачи с емкостью водохранилища и сильно влияет на стоимость водохозяйственных объектов.

Кривая обеспеченности стока обуславливается природными факторами. Кривые же обеспеченности отдачи, вероятных дефицитов отдачи сбросов, конечных наполнений и напоров относятся к результатам регулирования. При их получении или построении учитывают не только сток и его изменения, но и потери воды, плановую отдачу, начальное наполнение водохранилища, его емкость, правила регулирования.

Приравнивать расчетную обеспеченность стока к расчетной обеспеченности отдачи в условиях регулирования не следует.

Расчетная обеспеченность требует технико-экономического обоснования, которое необходимо и при назначении общих ее нормативов и при определении ее индивидуально для крупных объектов. Но достаточно точное обоснование обеспеченности встречает затруднения и единой методики пока нет. Для этой цели А. Д. Саваренский рекомендует метод системы водохозяйственных вариантов.

В методе выделяются водохозяйственные варианты, различающиеся сочетаниями разных объемов водохранилищ и разных мощностей ирригационных систем, гидроэнергетических установок и других компо-

нентов комплекса. Кроме водохозяйственных вариантов, оцениваются технические, технологические и эксплуатационные подварианты. Для вариантов и подвариантов указываются главные их параметры, определяющие технико-экономические показатели. В числе отраслевых эксплуатационных параметров фигурируют варианты расчетной обеспеченности. В результате расчетов определяется оптимальное сочетание расчетных обеспеченностей по входящим в комплекс отраслям водного хозяйства.

Этот метод применялся при проектировании ирригационных систем с регулированием стока в условиях засушливого Заволжья и других орошаемых районов.

Для водохранилищ ирригационного назначения влияние погодных особенностей, условия эксплуатации и ведения сельского хозяйства затрудняют установление строгой зависимости уровня рентабельности сельскохозяйственного производства от обеспеченности водой оросительных систем. Учет несовпадения маловодных и засушливых лет (по Я. Ф. Плешкову) может иногда увеличить площадь орошения на 20—25%.

Расчетная обеспеченность годовой отдачи нормирует вероятность превышения заданных расходов или объема отдачи и не отражает перебоев водоотдачи или их продолжительности. Между тем объем недоданной воды, а также величина и продолжительность перебоя при орошении играют решающую роль.

По мере роста водособеспеченности рентабельность системы возрастает. Дополнительный объем зарегулированного стока позволяет получить дополнительные прирост орошаемой площади и выход продукции.

Глава II. ВОДОХРАНИЛИЩА

§ 1. Типы плотинных водохранилищ

Наиболее распространены водохранилища, образованные плотинами, перегораживающими долины рек, или приплотинные водохранилища (рис. 59).

Водохранилища служат для: создания запаса воды, гарантирующего бездефицитное снабжение потребителей; трансформации расходов наводков и половодий; осаждения влекомых и взвешенных наносов.

Подпор влечет за собой подъем уровней верхнего бьефа, увеличение судоходных глубин, создает напор на гидроэлектростанциях, улучшает условия водозабора при орошении и водоснабжении.

На выбор местоположения створа подпорных сооружений и величину емкости оказывают влияние топография, геология и гидрогеология, экономика, климатические условия.

Возможная емкость водохранилища в основном зависит от топографии участка реки (уклон, очертание в плане долины, поперечные размеры, рельеф). По длине реки условия строительства водохранилищ изменяются.

Водохранилища классифицируют по ряду признаков.

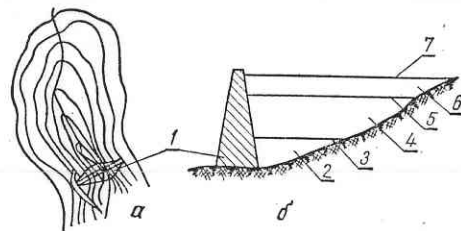


Рис. 59. План водохранилища (а) и схематический продольный профиль водохранилища (б):

1 — плотина; 2 — мертвый объем; 3 — уровень мертвого объема УМО или МПУ; 4 — полезная емкость водохранилища; 5 — нормальный подпорный уровень; 6 — емкость форсировки; 7 — форсированный подпорный уровень ФПУ.

ческой сети. При небольших уклонах, характерных для равнинных условий, создание водохранилищ связано с большим затоплением и подтоплением в соответствии с площадью зеркала. Высокая ценность пойменных земель, необходимость в переносе населенных пунктов, важных объектов не позволяют полностью использовать сток и ограничивают отметки подпорных сооружений на средних и крупных реках. Высотная отметка подпора лимитируется экономическими условиями. Глубины находятся в пределах 15—25 м (максимальные) и 5—9 м (средние).

На равнинных водохранилищах происходит резкое изменение ширины зеркала при снижении уровня до отметки основного русла.

Водохранилища, как правило, имеют большую емкость и используются в комплексных целях. К водохранилищам равнинного типа относятся Куйбышевское, Цимлянское, Рыбинское.

Водохранилища предгорных и плоскогорных областей характеризуются большими глубинами и значительной сработкой, небольшой переработкой берегов, незначительным затоплением и подтоплением территории, а также затруднениями в сельскохозяйственном освоении прибрежной зоны.

Горные водохранилища имеют следующие особенности: поперечный профиль долины горных рек обычно совпадает с руслом, он может иметь вид узкого каньона; склоны берегов крутые, нередко ступенчатые, русло реки слабоизвилистое, без поймы; при сработке площади зеркала изменяются нерезко. Расходы воды, площадь водосбора, амплитуда колебаний уровней малые, в то время как уклоны и скорости течения значительные. Река транспортирует по дну крупные фракции наносов, вследствие чего водохранилище подвержено занесению.

В этих условиях для создания большой емкости необходимо возведение высокой плотины. Затопляемая площадь, подтопление, переработка берегов, фильтрация из водохранилища при правильном выборе створа небольшие. При наличии сейсмичности капитальные затраты по гидроузлу возрастают.

По комплексу признаков А. Б. Авакян и В. А. Шарпов выделяют пять основных типов водохранилищ: равнинные, предгорных и плоскогорных областей, горные, озерные, наливные. У равнинных водохранилищ русло занимает только часть долины, в плане оно извилистое, пойма с понижениями и староречьями, преобладает асимметрия берегов. В результате подпора вода заполняет русло, пойму, низовые участки притоков и часть гидрографической сети.

Озерные водохранилища являются наиболее экономически эффективными. Они характеризуются тем, что затопление и подтопление небольшие, сработка невелика и при относительно малых подпорах в них задерживаются значительные объемы воды для последующего использования.

К водохранилищам озерного типа относятся Иркутское (Байкальское) и многие другие, создающие подпор озерам.

Водохранилища наливного типа применяются главным образом при орошении. При таком типе уменьшается угроза быстрого занесения и заиливания водохранилищ. Подобные водохранилища находятся в Киргизии, Туркмении, Узбекистане (низовья Амударьи).

На оросительных каналах иногда создаются водохранилища для внутрисистемного регулирования (например, Хаузахское на Каракумском канале).

В нижнем течении рек условия для строительства крупных водохранилищ менее благоприятны, так как требуются значительные обвалования русел для предотвращения затоплений больших территорий.

Водохранилища в низовьях рек строят главным образом для орошения риса, поддержания близкого к естественному водного режима пойменных земель в нижнем бьефе и создания условий для нереста рыбы.

§ 2. Основные емкости и нормативные уровни водохранилища

При гидротехническом проектировании нормативные уровни часто называют горизонтами. Отметки уровней относят к створу водохранилищной плотины. Отметки зеркала вверх по водохранилищу повышаются по кривой подпора.

Полезная емкость $V_{плз}$ и мертвый объем $V_{мо}$ определяют основные размеры водохранилища (см. рис. 59). Полезная емкость обеспечивает процессы регулирования стока и предназначена для поддержания гарантированной отдачи за расчетные интервалы времени.

Величина полезной емкости зависит от продолжительности регулирования (суточное, сезонно-годовое, многолетнее) и изменяется в широких пределах. При многолетнем регулировании стока воды полезная емкость водохранилища при некоторых методах расчета подразделяется на две составляющие емкости — сезонно-годовую и многолетнюю.

Сезонно-годовая составляющая полезной емкости срабатывается ежегодно и выполняет роль регулятора низкого стока в маловодный лимитирующий сезон года. Режим сработки полезной емкости подчинен правилам регулирования.

При детальном проектировании иногда назначаются расчетные интервалы (группы) наполнений, которыми водохранилище делится на различные зоны отдачи. Наполнением называется объем воды, находящийся в водохранилище на любой момент времени. Мертвым объемом называют постоянный объем, который непосредственно не участвует

в регулировании стока и не подлежит сработке в нормальных условиях эксплуатации, но имеет большое практическое значение для поддержания устойчивой работы водохранилища.

При наличии в плотине донных отверстий мертвый объем делится на две части: 1) объем ниже отверстий, не срабатываемый самотеком; 2) объем выше отверстий, не используемый в нормальных условиях эксплуатации.

В исключительно маловодные годы последний объем может частично срабатываться при технико-экономическом обосновании целесообразности этой сработки.

Предельными уровнями водохранилища, ограничивающими полезную емкость, являются нормальный подпорный уровень (НПУ) и уровень мертвого объема (УМО).

Нормальным подпорным уровнем называется проектный уровень наполнения водохранилища, ограничивающий сверху полезный объем. НПУ может поддерживаться подпорными сооружениями длительный период. Применительно к НПУ рассчитывают сооружения, входящие в состав водохозяйственной установки, обеспечивающей работу водохранилища; определяют стоимостные показатели; учитывают волновое воздействие; назначают глубину сработки для нормальных условий эксплуатации. От отметки НПУ с учетом кривой подпора вычисляют ущерб, нанесенный народному хозяйству затоплением, подтоплением и переработкой берегов. Повышение уровня водохранилища над НПУ в нормальных условиях эксплуатации недопустимо, за исключением кратковременных подъемов уровня вследствие ветрового нагона.

Выбор отметки НПУ — наиболее ответственная задача проектирования. От правильного назначения ее в значительной степени зависят рациональный режим использования стока, удовлетворение плановой отдачи, работа сооружений, их габариты и размещение. Отметку НПУ устанавливают на основе технико-экономических расчетов различных вариантов.

Кратковременное повышение уровня водохранилища над отметкой НПУ называется форсировкой. Форсировку уровней для крупных объектов допускают только в случае невозможности пропуска расходов всеми отверстиями гидроузла (турбины, донные отверстия, шлюзы, водозаборные устройства). Не предусмотренное проектом превышение уровней над НПУ равносильно повышению его отметки и недопустимо.

Продолжительное превышение отметки НПУ наносит ущерб народному хозяйству, увеличивает площадь затопляемой, подтопляемой территории в верхнем бьефе. Это прежде всего затрагивает интересы сельского хозяйства и не может оправдываться даже большей рентабельностью мероприятия.

Размер ущерба от гибели посевов в результате форсирования уровня НПУ Цимлянского водохранилища на срок свыше 15 дней за 1955—1957 гг. выражается в сотнях тысяч рублей.

Минимальный подпорный уровень, ограничивающий мертвый объем сверху, называется уровнем мертвого объема. УМО представля-

ет один из важных параметров регулирования, и правильный выбор его отметки имеет большое значение.

Для водохранилищ, которые обслуживают орошение или коммунальное и промышленное водоснабжение и сооружаются на реках, транспортирующих большое количество наносов, или в горных и предгорных районах, или на временных и малых водотоках, решающим условием для нахождения мертвого объема служит заиливание водохранилища. Наносы, аккумулируясь в водохранилище, постепенно заполняют его емкость.

Для того чтобы весь комплекс сооружений по регулированию стока работал в нормальных условиях и в течение продолжительного времени, необходим большой запас емкости, достаточный для аккумуляции наносов без уменьшения полезного объема. Этот запас емкости постоянно сокращается по мере занесения, а следовательно, уменьшается и регулирующее значение водохранилища, эксплуатация которого происходит в ненормальных условиях. Отдача при этом снижается. Заиливание водохранилища — природный процесс, его нельзя предотвратить, но можно ослабить.

На равнинных реках с относительно небольшим количеством наносов процесс заиливания и занесения водохранилищ протекает медленно, минимальный проектный уровень определяется другими условиями.

Последний в этих условиях назначают, исходя из требований обеспечения интересов водопотребителей и водопользователей и экономической целесообразности их удовлетворения. При транспортном использовании водохранилища УМО определяют как минимальный навигационный уровень, по которому обеспечиваются необходимые глубины, принятые для водного пути. По этой же отметке рассчитывают пороги шлюзов, подходы к пристаням.

На водохранилищах гидроэлектростанций УМО соответствует отметке максимальной допустимой глубины сработки полезной емкости из условий поддержания напора. Большая сработка снижает напор и приводит к падению мощности и выработки электроэнергии. При заборе воды на орошение с подачей ее на участки самотеком УМО нередко назначают из условий командования и пропускной способности сооружений. Минимальные уровни для промышленных и коммунальных водозаборов и теплоэлектростанций рассчитывают, исходя из условия обеспечения проектной гарантированной отдачи. Минимальный уровень водохранилища в зимний период назначают с учетом водоснабжения в створе подпирающего гидроузла, зимнего отстоя судов, рыбного хозяйства и гидроэнергетики.

Уровень мертвого объема при регулировании стока соответствует отметке предвесенней сработки водохранилища. Выбор отметки УМО из санитарных условий предусматривает поддержание требуемого качества воды и недопущение маляриогенной обстановки вблизи населенных пунктов, зон отдыха и туризма.

При сработке водохранилища в летний период возможно образование в прибрежной зоне непродуктивных мелководий с глубинами менее 2 м. Наличие мелководий и заболоченности приводит не только к ухуд-

шению качества воды, но и к созданию условий для размножения малярийных комаров.

При проектировании в зависимости от местных условий предусматривается: использование мелководий под посевы влаголюбивых кормовых культур, разведение рыбы, водоплавающей птицы, организация звероводческих ферм (ондатра, нутрия), для чего намечается обвалование мелководий, создаются санитарные зоны у населенных пунктов и в местах водозаборных сооружений. При этом рассматривается прогноз качества воды при УМО. В обжитых районах для водоснабжения из водохранилища с емкостью менее 5 км^3 проводят полную очистку ложа.

Из санитарных условий при отсутствии возможности сельскохозяйственного или рыбохозяйственного освоения мелководий с глубинами менее 2—2,5 м площадь их обваловывают. Для прудов и мелких водохранилищ А. И. Молдованов рекомендует не допускать того, чтобы зона литорали (прибрежного мелководья) составляла более 25—30% от общей их площади.

В существующих и создаваемых водохранилищах, используемых в комплексных целях, средние глубины изменяются в широких пределах (от 2 до 90 м и более). Даже в мелких водохранилищах наибольшие глубины у створа плотины редко бывают меньше 10 м.

Понижение уровня водохранилища ниже установленной отметки УМО вообще возможно, но это приводит к нарушению оптимального режима регулирования или ухудшению работы отдельных сооружений. Иногда снижение отметок водохранилища ниже УМО всего на несколько десятков сантиметров, по данным А. Б. Авакяна и В. А. Шарапова, осложняет зимний отстой судов, может привести к посадке судов в затонах на дно, задерживает заполнение водохранилища и ухудшает работу водозаборных сооружений.

Уровни мертвого объема назначают выше отметок водоприемных отверстий турбин, водозаборных сооружений, оросительных систем, промышленного и коммунального водоснабжения, судоходных камер шлюзов, нижней кромки крепления откосов защитных сооружений. При водохранилищах комплексного назначения отметки УМО вычисляют на основании технико-экономических расчетов, если они не противоречат условиям заиливания водохранилища.

Выше НПУ размещается емкость форсировки V_f , которая заполняется временно и служит для срезки максимальных расходов паводков и паводков в целях уменьшения размеров водосбросных сооружений. При спаде высоких вод емкость форсировки немедленно опорожняется, так как сооружения гидроузла не приспособлены к работе в подобных условиях. Если водохранилище предназначено для борьбы с наводнениями на нижележащем участке реки, то опорожнение емкости может быть продолжительным. В этих случаях проводят специальные расчеты.

Противопаводочная емкость в этом случае делится на управляемую и неуправляемую части. Емкость, которая находится ниже отметки водослива со свободным переливом воды через гребень или до верхней

кромки затворов, называют управляемой. Часть емкости выше отметки гребня водослива (при отсутствии затворов) или над верхней кромкой затвора считают неуправляемой. Ее отметка зависит от вероятности превышения максимальных расходов. Расположение водосливов ниже отметки НПУ и оборудование их затворами позволяют уменьшить неуправляемую часть емкости при условии, что отсутствует опасность наводнения в нижнем бьефе.

Уровни нижнего бьефа влияют на режим судоходства, мощность ГЭС и нормируются. Вводятся также ограничения в режим холостых сбросов. Удельные расходы воды на 1 пог. м, сбрасываемые сооружениями в нижний бьеф, ограничиваются во избежание размывов русла. При суточном и недельном регулировании устанавливают максимально допустимую величину внутрисуточных колебаний уровней нижнего бьефа. Поддерживают санитарный минимум расходов, обеспечивающий не только бесперебойную работу водозаборов, расположенных на реке ниже плотины, но и качественный состав воды.

Для затопления пойменных участков весной в интересах сельского и рыбного хозяйства проводят специальные попуски. В период попуска половодий и паводков максимальный уровень нижнего бьефа назначают из условий недопущения наводнения.

На ГЭС максимальный уровень нижнего бьефа в разные периоды года не должен превышать определенных величин, обеспечивающих выработку электроэнергии.

Вблизи входа в реку судовой деривации минимальный уровень выбирают из условия пропуска судов определенной осадки.

§ 3. Учет ветрового волнения при назначении отметок гребня сооружения

Чередование валов и впадин в определенном направлении на свободной поверхности водохранилища, возникающее под воздействием ветра, называется ветровыми волнами.

Основными волнообразующими факторами, определяющими высоту, длину и крутизну волн являются: скорость и направление ветра; размеры и очертание в плане водохранилища; его глубина по направлению разгона ветровых волн; продолжительность непрерывного ветра.

В зависимости от отношения глубины воды к длине волны различают глубокие и мелкие водоемы.

В глубоких водохранилищах или глубоководных зонах последних глубина воды больше половины длины волны: $H > \frac{\bar{\lambda}_{гд}}{2}$, где $\bar{\lambda}_{гд}$ — средняя длина волны, или горизонтальное расстояние между двумя смежными вершинами волны при глубокой воде.

В мелких водоемах при $H < \frac{\bar{\lambda}_{гд}}{2}$ на волновое движение воды оказывает влияние рельеф и шероховатость дна. При $H > \frac{\bar{\lambda}_{гд}}{2}$ влияние дна на волнение не учитывают. Глубину воды в водохранилище H

находят с учетом эксплуатационных периодов его работы и колебаний уровней, вызванных нагоном и сгоном.

Нагоном и сгоном называется подъем уровня под действием ветра у наветренного берега и спад у противоположного. При этом происходит перекося поверхности воды водохранилища.

Нормами проектирования рекомендуется определять высоту нагона воды $h_{нг}$ при расчетной скорости ветра по данным натурных исследований или по формуле:

$$h_{нг} = K \frac{Du_{10}^2}{3gH} \cos \alpha, \quad (1)$$

где u_{10} — расчетная максимальная скорость ветра, м/сек, с вероятностью превышения (табл. 2);

D — длина разгона ветровых волн, или протяженность водной поверхности, измеряемая по направлению ветра, км;

g — ускорение силы тяжести, м/сек²;

α — угол между осью водоема и направлением ветра;

K — коэффициент, зависящий от относительной глубины $\frac{H}{\lambda}$, ориентировочно принимается равным $6 \cdot 10^{-3}$.

Расчетная максимальная скорость ветра при ориентировочных расчетах равна удвоенному для сооружений I и II классов капитальности и полуторному значению средней из максимальных в году за период открытого русла скоростей по волноопасному для сооружений направлению.

В других случаях для вычисления параметров волн и величины нагона расчетную максимальную скорость ветра определяют путем статистической обработки максимальных скоростей ветра по годам с вероятностью превышения согласно таблице 2.

ТАБЛИЦА 2

Условия эксплуатации	Вероятности превышения максимальной скорости ветра при классе сооружений		
	I—II	III—IV	V
Нормальные	2%	4%	10%
При форсировке уровней	$\bar{u}_{10}$ — средняя многолетняя максимальная скорость ветра в период открытого русла для всех классов сооружений		

При проектировании сооружений на водохранилищах для назначения отметки на гребне, согласно СН 288—64, принимают различные сочетания уровней воды и скоростей ветра. Отметку гребня сооружений по нормам проектирования назначают с учетом его возвышения над расчетным статистическим уровнем.

Возвышение z_c определяют по формуле:

$$z_c = h_{нг} + h_{нр} + a, \quad (2)$$

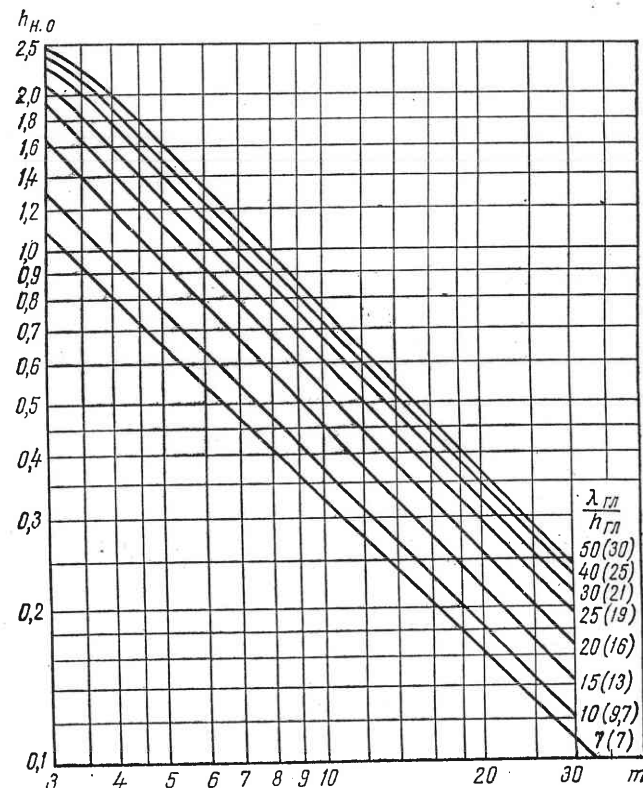


Рис. 60. Расчетная высота наката волн $h_{н.о} = h_{н.1\%}$ в отношении к местной высоте волн при заложении откоса $m \geq 3$ (значения шкалы пологостей волн, приведенные в скобках, принимаются при расчете наката по пологости волн на глубинах $H = 2h$).

где $h_{нг}$ — высота нагона при расчетной скорости ветра, м;
 $h_{нр}$ — расчетная высота наката волны на откосы обеспеченностью $p\%$ в данной системе волн, м (обеспеченность принимают равной для неукрепленных откосов и гребня сооружений, недопускающих перелив воды, 0,10%, для укрепленных 1%);
 a — запас высоты, зависящий от класса капитальности сооружений (для I класса капитальности $a = 0,5$ м, для II класса $a = 0,3$ м).

Расчетную высоту наката волн на откосы $h_{нр}$ для фронтально подходящих волн постоянной высоты и длины при глубине перед откосом $3h_{гп} \geq H > 2H$ определяют согласно СН 288—64:

$$h_{нр} = k_{\Delta} k_{\text{д}} h_{н.о} h, \quad (3)$$

где k_Δ и k_n — коэффициенты шероховатости и проницаемости откоса, принимаемые в зависимости от относительной шероховатости ($k_\Delta k_n = K_{ш}$);

$h_{н.о}$ — относительный накат для прямолинейного гладкого непроницаемого откоса, определяемый по рисунку 60 в зависимости от заложения откоса и пологостей волн $\frac{\lambda_{гд}}{h_{гд}}$ перед откосом;

h — высота ветровой волны.

Расчет высоты наката волны на откосы сложного сечения с берами, а также другие расчетные случаи, в том числе и при косом подходе волн к откосу, рассмотрены в СН 268—64.

Приблизительно расчетное значение высоты ветрового наката на укрепленные откосы сооружений с крутизной откоса $1 < m < 5$ нормативными указаниями рекомендуется вычислять по уточненной формуле Б. А. Пышкина:

$$h_{пр} = \frac{2K_{ш}h}{m} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{h}}. \quad (4)$$

$K_{ш}$ принимается в следующих пределах: для сплошного водонепроницаемого гладкого покрытия $K_{ш}=1$; бетонного покрытия сплошного и со швами, составляющими не более 5% общей площади, $K_{ш}=0,9$; водопроницаемых откосов из песка, гравия, щебня, камня и искусственных массивов $K_{ш}=0,9 \div 0,35$.

Расчетные параметры волн (высоту волны, длину, период и скорость перемещения волн) определяют в зависимости от глубокowodности водоема.

Для глубоководных водоемов и глубоководных зон водохранилищ при глубине воды в рассматриваемой точке $H > \frac{\lambda_{гд}}{2}$ параметры волн рекомендуется находить с использованием рисунка 61. По рисунку

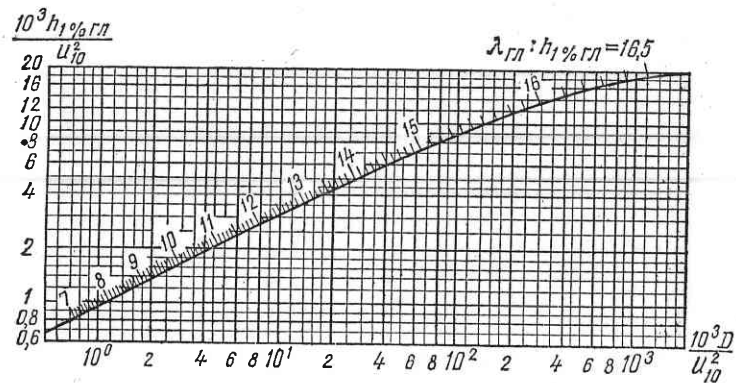


Рис. 61. График для определения параметров развитого волнения ($h_{1\%гд}$, м; $\lambda_{гд}$, м; u_{10} , м/сек).

можно определить высоту ветровой волны однопроцентной обеспеченности $h_{1\%гд}$, среднее значение длины волны $\bar{\lambda}_{гд}$ и пологость волны $\frac{\bar{\lambda}_{гд}}{h_{1\%гд}}$ в зависимости от величины $\frac{10^3 D}{u_{10}^2}$.

Среднее значение периода волн $\bar{\tau}_{гд}$ и скорость перемещения волн $\bar{c}_{гд}$ при $\frac{\bar{\lambda}_{гд}}{h_{1\%гд}} \geq 10$ находят по формулам:

$$\bar{\tau}_{гд} = 0,8 \sqrt{\bar{\lambda}_{гд}}; \quad \bar{c}_{гд} = \frac{\bar{\lambda}_{гд}}{\bar{\tau}_{гд}}.$$

Высоту волны мелкого водоема и при мелководье для соотношения $\frac{\lambda_{гд}}{2} > H > H_{кр}$ рассчитывают в заданной точке как произведение вы-

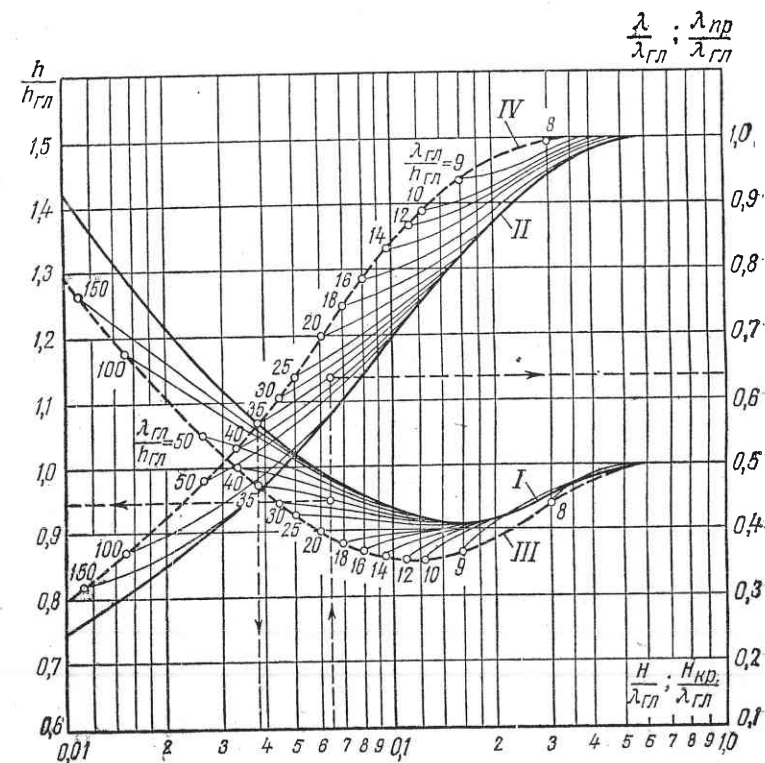


Рис. 62. График для определения относительной высоты волн $\frac{h}{h_{гд}}$ (кривые I), относительной длины волн $\frac{\lambda}{\lambda_{гд}}$ (кривые II), относительной критической глубины водоема $\frac{H_{кр}}{\lambda_{гд}}$.

соты волны глубоководья и поправочных коэффициентов. При расчете пользуются рисунком 62 (кривые I относительной высоты волн и кривые II относительной длины волн) по заданному значению $\frac{H}{\lambda_{гд}}$.

В зависимости от уклонов расчет рекомендуется проводить для трех расчетных случаев: $i_g < 0,001$; $0,001 < i_g < 0,01$; $i_g = 0,01 \div 0,1$.

Для нормальных условий отметку гребня плотины находят как

$$\nabla H_{пл} = \nabla НПУ + z_c = \nabla НПУ + h_{нт} + h_{пр} + a.$$

При форсировке уровней делают проверочный расчет.

§ 4. Характеристики водохранилища

Расчеты регулирования стока в стадии проектирования опираются на данные гидрологии, мелиорации, использования водной энергии, водоснабжения и т. д.

В результате расчетов регулирования стока получают характеристики фактических водоотдач, наполнений водохранилищ, холостых сбросов, мощностей. Эти характеристики необходимо определять с учетом наиболее эффективных режимов работы водохранилища в период эксплуатации. При расчетах регулирования стока основной задачей является исследование водохозяйственного баланса.

Требования на воду отраслей водного хозяйства, нормы водопотребления и водопользования и безвозвратные потери воды связаны с технологией производства и излагаются в соответствующих руководствах.

Водохозяйственный баланс — это сопоставление наличных доступных к использованию водных ресурсов с потребностями в воде. Потребность в воде устанавливают на определенные уровни развития отраслей народного хозяйства и прироста населения. При этом учитывают необходимость охраны природы.

При расчетах регулирования стока, связанных с проектированием водохранилищ, исходные расчетные данные включают сведения о водопотреблении при орошении, обводнении, водоснабжении, уровнях для речного транспорта, нагрузках ГЭС и т. д.

Последовательность и состав проектных и изыскательских работ, связанных с регулированием стока, установлены инструкциями, техническими указаниями и строительными нормами и правилами.

Потребность в регулировании стока воды выясняется сопоставлением приходной и расходной частей водохозяйственного баланса. Если отдача обеспечена естественным стоком воды во все интервалы времени, регулирования стока не требуется. Если при сопоставительных балансовых расчетах обнаруживаются дефициты стока в маловодные годы, сезоны или более короткие интервалы времени, возникает необходимость его регулирования.

Техническая возможность строительства подпорных сооружений и водохранилищ зависит от топографических, геологических и гидрогеологических особенностей долины реки и выясняется при проведении изысканий и обследований.

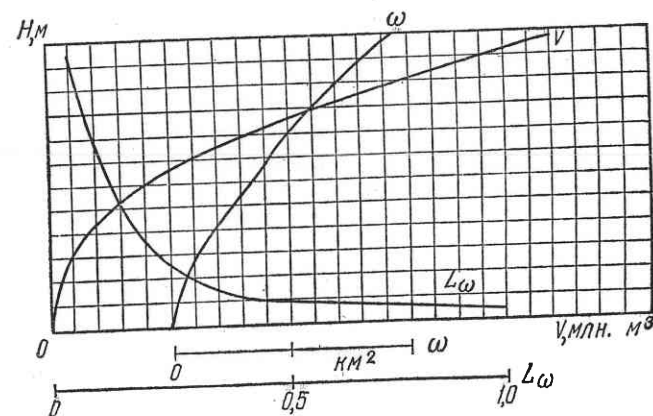


Рис. 63. Топографическая характеристика водохранилища.

Важнейшими для условий регулирования являются объемная и топографическая характеристики чаши будущего водохранилища.

Топографическая и объемная характеристики. При регулировании стока территория водохранилища и зоны его влияния обеспечиваются топографическими материалами, планами, картами масштабов 1 : 2000, 1 : 5000, 1 : 10 000 с сечением рельефа через 0,5; 1 и 2 м.

В верхнем бьефе зона влияния включает площади затопления, подтопления и обрушения (переработки берегов). Для их определения нужно иметь характерные кривые свободных расходов воды разной обеспеченности при прохождении максимальных расходов воды разной обеспеченности в естественных условиях и в условиях, нарушенных подпором основного русла и притоков, а также характеристику зимних и ледовых режимов в бытовых и зарегулированных условиях реки. Аналогичные материалы необходимы и для нижнего бьефа.

Состав топографических плановых съемок зависит от стоимости объекта. Для крупных водохранилищ требуется более подробный топографический материал, по которому строят батиметрические карты проектируемого водохранилища.

Для малых водохранилищ и прудов проводят съемку чаши и выполняют маршрутное обследование линии водораздела для примерной оценки площади водосбора.

Начальным проектным документом при расчетах регулирования стока служит полученная путем обработки данных съемок топографическая характеристика водохранилища (рис. 63).

Данные планиметрирования площадей горизонталей, снятых по замыкающему створу плотины, оформляют в виде таблицы или графика $\omega = f(H)$, где ω — площадь, ограниченная горизонталью при заданной отметке уровня, H — отметка горизонтали (уровня).

Поперечные профили русла водотока выполняют в масштабах 1 : 500; 1 : 1000.

Топографическая характеристика графически выражает связь основных показателей водохранилища с отметками горизонталей или уровней воды в створе плотины.

Топографическую характеристику строят в прямоугольной системе координат: на оси ординат откладывают отметки уровня воды в водохранилище, на оси абсцисс — переменные емкости (объемы) водохранилища, площади водной поверхности, средние глубины, площади и критерии литорали.

Построение характеристики проводят при допущении горизонтальности водной поверхности; тогда отметки горизонталей и уровней воды в створе подпора совпадают. На крупных слабопроточных водохранилищах уклон водной поверхности действительно незначителен и водную поверхность без особых погрешностей можно принять горизонтальной. При допущении горизонтальности уровней вычисляют статические емкости и по этим данным строят кривую $V_H = \varphi_1(H)$, где V_H — объем при отметке уровня H .

Кривая связи отметок горизонталей (уровней) и площадей, ими ограниченных $\omega = f(H)$, часто не имеет плавного очертания и отражает индивидуальные особенности рельефа.

Объемы, заключенные между смежными уровнями при допущении их горизонтальности, определяют по формуле усеченной пирамиды:

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{3} (\omega_i + \omega_{i+1}) + \sqrt{\omega_i \omega_{i+1}} \quad (5)$$

или более упрощенно:

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{2} (\omega_i + \omega_{i+1}) = \omega_{cp} \Delta H. \quad (6)$$

Объем первого от дна слоя вычисляют по формуле усеченного параболоида $\Delta V = \frac{2}{3} \omega_i \Delta H_i$.

Путем последовательного суммирования объемов, заключенных между смежными горизонталями, находят емкость водохранилища до замыкающей предельной отметки уровня:

$$V_H = \sum_0^H \omega \Delta H, \quad (7)$$

где ω — площадь водного зеркала водохранилища, га, км²;

ΔH — разность отметок горизонталей (уровней) при принятом сечении рельефа, м.

Среднюю глубину водохранилища h_{cp} в функции от отметки уровня находят как частное от деления объема (емкости) водохранилища на площадь $h_{cp} = \frac{V_H}{\omega_H}$.

Площадь литорали ω_L характеризует зону прибрежного мелководья с глубинами до 2 м и вычисляется как разность площадей водной по-

верхности при отметке H и на 2 м ниже ее. При $H=2$ м площадь литорали равна площади водного зеркала.

Критерий площади литорали $L_\omega = \frac{\omega_L}{\omega_H}$ в функции отметки уровня показывает, какая часть площади водоема занята мелководьем. Кривая $L_\omega = \varphi(H)$ имеет вид гиперболы. При $H=2$ м критерий площади литорали равняется единице.

Критерий объема литорали $L_V = \frac{V_L}{V_H}$ равняется отношению объема литорали V_L к емкости водохранилища V_H при заданной отметке уровня. Он нужен для оценки роли мелководья в процессе регулирования стока воды.

При водохозяйственном проектировании все элементы водохранилища зависят от емкости. Топографическая характеристика перестраивается в объемную. На оси абсцисс откладывают объемы воды, а по оси ординат — площади, средние глубины, отметки уровня у плотины и другие расчетные величины.

Экономическая характеристика водохранилища. Согласно указаниям, разработанным Гидропроектом, затраты по созданию водохранилища определяют по разделам: инженерная защита от затопления, подтопления и берегообрушения; переселение населения, снос строений, перенос их и новое строительство и мероприятия, связанные с ним (водоснабжение, канализация, благоустройство); земельное устройство земледельцев и восстановление сельскохозяйственного производства; перенос предприятий, переустройство объектов железнодорожного, автомобильного и трубопроводного транспорта, линий электропередачи, связи; освоение водохранилища (транспортное, рыбохозяйственное, сведение леса); санитарная подготовка территории зоны влияния водохранилища.

Капитальные затраты по строительству гидроузла включают затраты, связанные со строительством и оборудованием всех сооружений и устройств, и определяются соответствующими сметно-финансовыми расчетами.

При выборе варианта регулирования для выяснения его технико-экономической эффективности желательно представить затраты в функции от наполнений водохранилища или отметок уровней. С повышением уровней затраты по гидроузлу и водохранилищу возрастают. Для небольших объектов строительства и предварительных расчетов стоимостные показатели берут по укрупненным измерителям удельных капиталовложений.

Земляные плотины обычно проектируют распланными в форме трапеции (рис. 64). При вычислении тело земляной плотины небольших объектов трапецидального профиля, перекрывающее трапецидальное русло, принимают состоящим из двух объемов (ядра и откосов): $V_{пл} = V_{ядр} + V_{отк}$

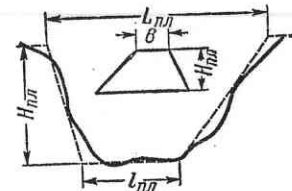


Рис. 64. Схематический поперечный профиль долины и земляной плотины.

Объем средней части плотины (ядра) равен:

$$V_{\text{ядр}} = H_{\text{пл}} b \left(\frac{l_{\text{пл}} + L_{\text{пл}}}{2} \right), \quad (8)$$

а объем откосной части равен:

$$V_{\text{отк}} = m_{\text{ср}} H_{\text{пл}}^2 \left(\frac{2l_{\text{пл}} + L_{\text{пл}}}{3} \right), \quad (9)$$

где $H_{\text{пл}}$ — высота плотины;

$l_{\text{пл}}$ — длина плотины понизу;

$L_{\text{пл}}$ — длина плотины поверху;

b — ширина земляной плотины поверху;

$m_{\text{ср}}$ — среднее заложение откоса плотины, равное

$$m_{\text{ср}} = \frac{m_{\text{в}} + m_{\text{н}}}{2};$$

$m_{\text{в}}$ — заложение верхового напорного откоса;

$m_{\text{н}}$ — заложение низового сухого откоса.

М. В. Потапов рекомендует вычислять откосную часть по более общей зависимости (вычисление объема ядра не меняется):

$$V_{\text{отк}} = m_{\text{ср}} H_{\text{пл}}^2 k \left(\frac{l_{\text{пл}} + L_{\text{пл}}}{2} \right), \quad (10)$$

где k — коэффициент формы русла (берется по таблице 3 в зависимости от отношения $\frac{l_{\text{пл}}}{L_{\text{пл}}}$).

ТАБЛИЦА 3

$\frac{l_{\text{пл}}}{L_{\text{пл}}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k	0,67	0,73	0,78	0,82	0,86	0,89	0,92	0,94	0,96	0,98	1,0

Для трапецидального русла $L_{\text{пл}} = l_{\text{пл}} + 2\bar{m}_{\text{д}} H_{\text{пл}}$, где $\bar{m}_{\text{д}}$ — среднее заложение откосов долины при трапецидальной форме русла.

Тело земляной плотины трапецидального поперечного профиля при параболической форме русла вычисляется в том же порядке. Объем центрального ядра земляной плотины равен:

$$V_{\text{ядр}} = \frac{2}{3} H_{\text{пл}} L_{\text{пл}} b, \quad (11)$$

объем откосной части:

$$V_{\text{отк}} = m_{\text{ср}} H_{\text{пл}}^2 \frac{2}{3} L_{\text{пл}} 0,8. \quad (12)$$

Глава III. ПОТЕРИ ВОДЫ ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ

§ 1. Учет потерь воды на дополнительное испарение

После сооружения водохранилища образуется дополнительная площадь, покрытая водой.

Считают, что режим осадков на участке водохранилища практически не изменяется, а испаряющаяся с его поверхности вода полностью выносится воздушными потоками за пределы речного бассейна.

Для районов, где испарение с водной поверхности превышает испарение с суши (а количество таких районов значительно уменьшилось в связи с внесением поправок к показаниям осадкомеров), создание нового водоема вызывает дополнительные затраты воды, которые могут снизить отдачу. Изменяется роль осадков в балансе водохранилища.

Осадки, выпадающие на покрытую водой или льдом поверхность водохранилища, увеличивают его наполнение. Коэффициент стока становится равным единице (до устройства водохранилища он был значительно меньше). Количество воды, поступающее в водохранилище, равно разности между осадками и испарением с водной поверхности. Возникают дополнительные потери воды на испарение, связанные с подтоплением, развитием водной растительности. При сработке водохранилища испарение с обнаженного от воды ложа превышает испарение с суши.

Среднемноголетние потери воды на дополнительное испарение равны разности между испарением с водной поверхности и испарением с чаши водохранилища до его создания.

Поверхность до затопления включает сушу, пойму, русло реки, болота, озера. Средний слой испарения с чаши водохранилища до затопления составляет:

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_{\text{в}} \omega_{\text{в}} + E_{\text{с}} \omega_{\text{с}} + E_{\text{п}} \omega_{\text{п}}}{\omega_{\text{в}} + \omega_{\text{с}} + \omega_{\text{п}}}, \quad (13)$$

где $E_{\text{в}}, E_{\text{с}}, E_{\text{п}}$ — слой испарения соответственно с поверхности русла реки (водной), суши и поймы, мм;

$\omega_{\text{в}}, \omega_{\text{с}}, \omega_{\text{п}}$ — площади речного русла, затопляемой суши и поймы, км² (определяются по топографическим данным).

Испарение с поймы приближенно принимают для районов недостаточного увлажнения равным $\frac{2}{3}$ испарения с водной поверхности, а для районов достаточного и избыточного увлажнения — равным испарению с водной поверхности, если площадь поймы составляет небольшую долю от суммарной площади затопления суши и речного русла. Потери воды на дополнительное испарение вычисляют по среднему уровню воды в водохранилище за расчетные интервалы времени.

Слой испарения с зоны подтопления $E_{\text{з.п.}}$ принимают равным испарению с поймы или устанавливают по данным исследований. Зона подтопления — это участок суши, прилегающий к контуру водохранилища, с глубиной залегания грунтовых вод не более 2—2,5 м. В нормальных условиях эксплуатации водохранилища потери воды на до-

полнительное испарение вычисляют с площадей, ограниченных отметками НПУ и УМО. В пределах этих уровней исключается возможность планомерного сельскохозяйственного использования территории. Максимальная площадь затопления и учет подтопления соответствует площади при нормально подпорном уровне. Неодинаковая интенсивность сработки водохранилища в пределах от НПУ до УМО создает различные условия испарения с обнаженного от воды ложа водохранилища и должна учитываться при определении потерь воды на дополнительное испарение.

При вычислении потерь воды на дополнительное испарение прежде всего определяют потери на испарение с водной поверхности и суши.

При наличии данных наблюдений за метеорологическими элементами на водоеме величину слоя испарения с водной поверхности вычисляют по обобщенной формуле А. П. Браславского и В. П. Викулиной. Если наблюдения за метеорологическими элементами проводились на метеостанции, расположенной на суше, то при расчете слоя испарения с водной поверхности используют метод теплового баланса (по А. П. Браславскому), календарный ряд наблюдений на плавучем испарителе ГГИ — 3000, наблюдения за испарением в бассейнах площадью 20 м² или карту норм испарения.

Величины испарения различной обеспеченности находят путем статистической обработки. При отсутствии данных наблюдений коэффициент вариации испарения с водной поверхности принимают равными 0,1—0,15, в зависимости от зоны, а коэффициент асимметрии равным нулю. Расчетную обеспеченность испарения с водной поверхности приблизительно вычисляют как дополнение до 100% обеспеченности речного стока:

$$p = 100 - p_y, \quad (14)$$

где p_y — расчетная обеспеченность стока.

Испарение с поверхности суши вычисляют по методам водного или теплового балансов, по температуре и влажности воздуха и др. При многолетнем регулировании стока средние потери на дополнительное испарение находят по разности:

$$\bar{E}_d = \bar{E}_v - \bar{E}_{cp}, \quad (15)$$

где $\bar{E}_v$ — среднемноголетняя величина испарения с водной поверхности;

$\bar{E}_{cp}$ — средневзвешенное испарение с площади до устройства водохранилища.

Испарение с водной поверхности за n лет вычисляют по зависимости:

$$E_{v.n} = \bar{E}_v \left(\frac{C_v}{V_n} \Phi_{pE} + 1 \right), \quad (16)$$

где $E_{v.n}$ — испарение с водной поверхности за n -летие в период открытого русла;

Φ_{pE} — отклонение ординат кривой обеспеченности от середины при $C_v = 1$;

p_E — расчетная обеспеченность испарения с водной поверхности, взятая как дополнение до 100%-ной обеспеченности стока.

Потери приблизительно относятся к среднему объему водохранилища за интервалам времени за период открытого русла.

По среднему объему водохранилища с объемной или топографической характеристики снимают среднюю площадь водной поверхности ω_{cp} в м², га, км².

Объем потерь на дополнительное испарение при многолетнем регулировании стока находят как

$$\Delta E_d = \bar{E}_d \omega_{cp} \text{ м}^3. \quad (17)$$

При сезонном регулировании стока приблизительно потери на дополнительное испарение, связанное с устройством водохранилища, находят по разности между слоями испарения с водной поверхности и слоем осадков с учетом различной их обеспеченности, по принятым интервалам времени за период открытого русла.

А. А. Соколов предложил учитывать норму потерь стока в связи с созданием водохранилищ по соотношениям элементов водного баланса. При этом отпадает необходимость вычислять средневзвешенную величину испарения до устройства водохранилища.

Допускается, что норма стока с площади водохранилища до его создания равна слою стока (норме) с площади водосбора реки в створе плотины.

Потери стока в долях нормы стока (по А. А. Соколову) составляют;

$$\Delta h = \frac{h_1 - h}{h} = P \left(\frac{x - E_v}{h} - 1 \right), \quad (18)$$

где h_1 — слой стока (норма) с площади водосбора реки после создания водохранилища;

P — доля водосборной площади, занимаемой водохранилищем;

x — слой (норма) годовых осадков, выпадающих на водную поверхность, с учетом поправок;

E_v — слой (норма) испарения с водной поверхности.

Если направление течения реки следует из засушливых в более увлажненные области, норма стока с площади водосбора не равна норме стока с площади ω , она меньше $h_\omega > h$.

Если водохранилище создано на реке с направлением течения из увлажненных областей в менее увлажненные, норма стока с площади будущего затопления h_ω меньше средней нормы стока для всего бассейна $h > h_\omega$.

С учетом этих различий в нормах стока с площадей водохранилищ и водосбора расчет потерь стока ведут по зависимости:

$$\Delta h = P \left(\frac{x - E_v}{h} - \frac{h_\omega}{h} \right), \quad (19)$$

где h_ω — слой (норма) стока с площади будущего водохранилища до постройки плотины.

А. В. Огиевский определяет потери на дополнительное испарение по формуле:

$$\bar{E}_d = \bar{E}_v - \bar{x}(1 - \alpha_c), \quad (20)$$

где $\bar{E}_v$ — слой испарения с водной поверхности, мм;

$\bar{x}$ — осадки (норма), мм;

α_c — коэффициент стока со склонов и речной долины, затопленных водохранилищем, $\beta_c = (1 - \alpha_c)$.

Значения коэффициентов α_c и β_c зависят от условий стока, определяются по таблице 4 (над чертой α_c , под чертой — β_c).

Т а б л и ц а 4

Характеристики условий стока	Значение α_c и β_c для сезонов года			Год (кроме зимы)
	весна	лето	осень	
Песчаная пойма или пойма из иных легкопроницаемых пород, заросшая травой и редким кустарником	0,20	0,05	0,10	0,10
	(0,80)	(0,95)	(0,90)	(0,90)
Глинистые, каменные и другие слабопроницаемые породы при наличии значительных уклонов	0,80	0,40	0,60	0,60
	(0,20)	(0,60)	(0,40)	(0,40)
Средние условия	0,50	0,20	0,40	0,35
	(0,50)	(0,80)	(0,60)	(0,65)

По В. И. Мокляку, расчетный слой потерь на испарение находят в виде:

$$E_p = K_{100-p} \bar{E}_v - K'_p \bar{x}(1 - \alpha_c),$$

где K_{100-p} — модульный коэффициент испарения с водной поверхности (в приложении 1);

K'_p — модульный коэффициент слоя осадков (в приложении 1);

p — процент обеспеченности осадков. При отсутствии наблюдений за осадками;

C_{v_x} принимается равным 0,25; $C_{s_x} = 2C_{v_x}$.

Прием расчета приближенный.

Для зимнего периода потери на дополнительное испарение не вычисляют, осадки, выпавшие на лед, учитывают как приходную часть баланса, так как они немедленно обращаются в сток.

Потери на дополнительное испарение могут иметь отрицательные значения не только зимой, но и летом, когда водохранилище затопляет заболоченную местность, покрытую растительностью, так как испарение с нее может превышать испарение с воды. Для водохранилищ, находящихся в особых условиях (зарастающих, высокоминерализованных, замутненных или расположенных на территории высокогорья, расслохранилищ, охладителей, накопителей промышленных стоков),

применяют специальные приемы расчета, регламентируемые техническими условиями.

Для северных районов потери на дополнительное испарение в балансе водохранилища большого значения не имеют, их можно вычислять приближенно. Для сухой зоны разница между испарением с водной поверхности и суши весьма значительна.

Нахождение потерь на дополнительное испарение по коротким интервалам календарного ряда наблюдений связано с трудоемкими вычислениями. Для приближенных способов расчета внутригодичного распределения дополнительных потерь на испарение принимают следующие допущения:

потери за год остаются постоянными и от водности и метеорологической обстановки не зависят, их можно вычислить по среднему году;

вычисленные потери делят по месяцам периода открытого русла без учета наполнения;

расчет внутригодичного распределения дополнительных потерь делается для 3—5 градаций водности.

Потери на дополнительное испарение для южных районов Союза составляют значительную долю от стока и снижают отдачу из водохранилища. Дополнительные потери на испарение с водной поверхности Цимлянского водохранилища составляют 1,9 км³, что соответствует 5,7% от стока р. Дона у г. Калач.

Пруды на малых реках и временных водотоках уменьшают норму стока на 10—15% за счет потерь на испарение с водной поверхности.

§ 2. Определение суммарных потерь на фильтрацию

Величина фильтрационных потерь чаши водохранилища зависит от его гидрогеологических условий, характера напластования водонесных слоев, высоты подпора и ширины преграждаемой долины.

Потерями на фильтрацию называют разность объемов подземного притока и оттока по контуру чаши водохранилища в естественных условиях и после создания подпора.

Постоянную разовую аккумуляцию части стока во время первоначального заполнения водохранилища до уровня мертвого объема и создания его подземной емкости учитывают самостоятельно для начального периода эксплуатации.

Знакопеременная аккумуляция воды в зоне подземного контура водоема при ежегодном заполнении водохранилища и его сработке в расчетах фильтрационных потерь не учитывается.

Детальные расчеты фильтрации проводят при гидротехническом проектировании в целях обеспечения устойчивости сооружений.

При расчетах регулирования стока учет фильтрации по контуру чаши водоема, созданной подпором в нижележащие слои грунта или в другие бассейны, проводят суммарно для уточнения расходной части баланса. Подсчеты суммарных потерь в этом случае приближенные и не могут заменять расчетов фильтрации при гидротехническом проектировании гидроузла, образующего водохранилище.

Когда наклон водоносных слоев направлен к водохранилищу, а уровень грунтовых вод выше его максимального уровня, потери на фильтрацию незначительны.

Местные гидрогеологические и геологические условия весьма разнообразны. Учет их особенно важен при строительстве водохранилищ на реках, не дренирующих грунтовые воды, а также при глубоком залегании грунтовых вод по отношению к уровням наполнения водохранилища.

По данным В. А. Бахтиярова, подземная емкость Цимлянского водохранилища составила $2,03 \text{ км}^3$, или 15% от полезной.

Повышение и снижение уровней в наземном и подземном водохранилищах различают по времени.

Фильтрационные потери вычисляют при среднем уровне наполнения. При приближенных расчетах потери на фильтрацию относят к единице площади или объема водохранилища и принимают постоянными.

В ответственных случаях проектирования водохранилищ для уточнения потерь на фильтрацию проводят специальные исследования. Ориентировочно подсчет суммарных потерь на фильтрацию при хозяйственных расчетах проводят в зависимости от гидрогеологических условий.

Хорошие гидрогеологические условия соответствуют случаю, когда ложе водохранилища водонепроницаемое, а уровень грунтовых вод на участке залегает выше отметок подпорных уровней.

Средние условия характеризуются малопроницаемыми грунтами ложа, например суглинками, грунтовые воды находятся выше уровня мертвого объема.

При плохих гидрогеологических условиях ложе водохранилища сложено водопроницаемыми грунтами, имеется отток из водохранилища на питание грунтовых вод. Нормы потерь на фильтрацию М. В. Потопов предложил приближенно принимать в виде слоя с единицы площади или в процентах от среднего объема за период осреднения (табл. 5).

ТАБЛИЦА 5

Гидрогеологические условия	Слой за год, см	% от среднего объема	
		за год	за месяц
Хорошие	0—50	5—10	0,5—1
Средние	50—100	10—20	1—1,5
Плохие	> 100—200	> 20—40	> 1,5—3

Фильтрационные потери назначают иногда на основе использования материалов эксплуатации водохранилищ в районе строительства, а также данных региональных водно-балансовых исследований.

Фильтрационные потери в эксплуатационных условиях определяют путем измерения всех составляющих баланса в водохранилище. Водные балансы составляют за месяц или другие интервалы времени.

Снижение фильтрационных потерь объясняется кольматацией ложа водохранилища и повышением уровня грунтовых вод. Стабилизация потерь в условиях нормальной эксплуатации водохранилища наступает примерно через 4—5 лет.

Потери воды на фильтрацию из водохранилищ, гидравлически взаимосвязанных между собой, увязываются в виде баланса возвратных и фильтрационных вод.

§ 3. Ледообразование и другие потери воды

При отрицательных температурах воздуха в водохранилище образуется устойчивый ледостав, на который выпадают осадки в виде снега.

Запас воды, временно аккумулированный в ледяном и снежном покровах, не может быть непосредственно использован для повышения отдачи.

Если водохранилище зимой полностью не срабатывается, то ледяной и снежный покров затруднений в эксплуатацию не вносят, а наличие устойчивого ледостава предотвращает возможность образования внутриводного льда (шуги). Расходы отдачи также не снижаются, так как лед и покрывающий его снег своим весом вытесняют эквивалентный объем воды.

Потерями воды при ледообразовании называют запасы воды в снегу и во льду, временно задержанные на пологих берегах при зимнем опорожнении водохранилища. Толщина льда зависит от суммы отрицательных температур, от средней высоты снега и скорости течения за период ледообразования. Увеличение суммы отрицательных температур, снижение скорости течения в водохранилищах способствуют росту толщины льда.

При значительном снежном покрове процессы ледообразования затухают. Из-за малых скоростей воды толщина льда в водохранилище больше, чем в реках данного района, и замерзают они обычно раньше рек, а освобождаются ото льда позднее.

Значительное ветровое волнение на крупных водохранилищах может задержать образование устойчивого ледостава в начале ледообразования. Объем воды, аккумулируемый в снежном и ледяном покрове, оседающем на пологих берегах водохранилища при зимней его сработке, зависит от толщины льда и снега и от очертания береговых склонов долины.

Если в период устойчивого ледостава за расчетный интервал времени при относительно небольшой сработке площадь зеркала в начале значительно превышает площадь в конце интервала, то есть $\omega_n > \omega_k$, получают распластаный профиль береговых склонов чаши водохранилища и большие объемы осевшего на берегах льда и снега. Весной при всплывании осевшего на берегах льда и снега происходит дополнительное пополнение приточных расходов. Если всплывший

лед при весеннем половодье сбрасывается в нижний бьеф, запас воды в нем остается без использования и относится к безвозвратным потерям. При зимней сработке водохранилища запас воды, аккумулированной в снежном и ледяном покрове, осевшем на берегах, является потерей временной, но он может повлечь за собой снижение суммарного объема отдачи в зимний период.

Объем воды, аккумулированной в снежном и ледяном покрове, осевшем на берегах водохранилища, при его ежегодной зимней сработке вычисляют по формуле:

$$\Pi_{\lambda} = (\omega_n - \omega_k) (h_{\lambda} \gamma k + p h_{cp}) 10^9 \text{ м}^3, \quad (21)$$

где ω_n и ω_k — площади зеркала водохранилища в начале и конце периода зимней сработки, км;

γ и P — плотность льда и снега;

k — коэффициент, учитывающий постепенное нарастание толщины льда за зиму, равный 0,65;

h_{λ} — максимальная толщина льда к концу ледостава;

h_{cp} — средняя за период высота снежного покрова.

Для вычисления толщины льда предложен ряд формул (В. Н. Гончаров, П. И. Белокоп, Г. В. Брегман и др.).

По Г. В. Брегману, толщину льда определяют в виде:

$$h_{\lambda} = (\sum -t^{\circ})^{0,87}. \quad (22)$$

По формуле П. И. Белокопья толщина льда равна

$$h_{\lambda} = 2 \sqrt{\sum (-t^{\circ}) + 70},$$

где $\sum (-t^{\circ})$ — сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха.

При энергетическом использовании водохранилища и лимитирующем зимнем периоде запасы воды в снегу и льду, осевших на берегах, учитываются как потери при ежегодной сработке водохранилища до УМО.

При многолетнем регулировании стока потери вычисляют только в год полной сработки водохранилища:

$$\Pi_{\lambda, \text{мв}} = \frac{\Pi_{\lambda}}{n + t_3}, \quad (23)$$

где $\Pi_{\lambda, \text{мв}}$ — потери при многолетнем регулировании стока;

n — число лет календарного ряда;

t_3 — продолжительность зимней сработки в долях года.

На водохранилищах толщина льда больше, чем на реках; для крупных водохранилищ в равнинных условиях она увеличивается на 15—20%, для небольших водохранилищ и прудов — на 33%, на горных реках — на 80%.

К потерям воды иногда относят санитарные расходы, объемы воды, используемые на шлюзование, рыбоходы, золоудаление, промывку котлов. Объемы воды на шлюзование зависят от линейных размеров сооружения и количества сливных призм на расчетный период. Потреб-

ность в воде на рыбоходы определяется гидравлическим расчетом. Изъятие воды на питание котлов тепловых станций, смену водяных масс воды рассчитывают по специальным техническим условиям.

Расходы или объемы воды, используемые для различных целей производственного направления, не связанных непосредственно с основным назначением водохранилища, относятся к потерям условно.

§ 4. Мероприятия по уменьшению потерь воды

Уменьшение потерь на дополнительное испарение зависит от понижения скорости ветра и температуры на поверхности водоема, увеличения влажности воздуха, создания препятствий для проникновения водяных паров в атмосферу.

Для снижения скорости ветра по периметру водохранилища сажают высокорастущие деревья, устраивают искусственные заграждения; уменьшают длину разгона воздушного потока над водоемом обвалованием; предусматривают строительство водохранилищ в глубоких выемках, котловинах с крутыми берегами.

Для понижения температуры поверхности воды проводят сработку летом поверхностных более теплых слоев воды, увеличивают проточность и глубину водоема; ликвидируют легко прогреваемые непродуктивные мелководья; устраивают на берегах водоема ледохранилища, ликвидируют заросли водной растительности.

Увеличение влажности воздуха достигается большим развитием орошения вблизи водохранилища. Интенсивность испарения уменьшается при устройстве различных искусственных водонепроницаемых покрытий, создания органических пленок из жировых веществ, безвредных для животных и растений.

Все мероприятия по уменьшению потерь воды на испарение обосновываются технико-экономическими расчетами. Наличие зон мелководий, высокое стояние уровня грунтовых вод увеличивает потери на испарение. Уменьшение растительности, осушение земель снижает потери.

Мероприятия для уменьшения потерь воды на фильтрацию включают покрытие ложа водохранилища различными водонепроницаемыми одеждами (бетон, глинобетон, битум, жидкое стекло, полиэтиленовые пленки) и создание малопроницаемых для воды слоев грунта (солонцевание, применение раствора дубильных веществ, уплотнение, кольматация ложа). Для местоположения створа плотины водохранилища следует выбирать устойчивые водонепроницаемые грунты.

Для крупных водохранилищ проведение мероприятий по уменьшению потерь воды на испарение и фильтрацию затруднено.

Глава IV. ЗАИЛЕНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

Продукты водной и ветровой эрозии, переносимые потоком, называют наносами. На малых реках сток наносов формируется за счет условий на водосборе. На больших реках сток наносов зависит в основном от водного режима.

Перемещаемые потоком наносы подразделяются на взвешенные и влекомые по дну. Крупные частицы, которые поток не в состоянии перемещать, образуют неподвижную часть донных отложений. Равнинные реки транспортируют преимущественно взвешенные наносы, доля влекомых наносов относительно невелика и не превышает 10% от стока взвешенных. Процесс осаждения взвешенных наносов называется заилением.

Процесс аккумуляции влекомых наносов в отличие от взвешенных считается занесением. Количество взвешенных наносов, содержащихся в единице объема, называется мутностью.

Различают общую среднюю мутность воды всего потока ρ , частную мутность, соответствующую фракции ρ_i , и среднюю мутность, отвечающую его транспортирующей способности $\rho_{тр}$ ($г/м^3$ или $кг/м^3$).

Количество наносов, проносимое рекой в единицу времени через поперечное сечение потока, называется расходом и обозначается буквой R .

Расход наносов получается умножением мутности на расход воды:

$$\begin{aligned} R &= 10^{-3} \rho Q \text{ кг/сек,} \\ R &= 10^{-6} \rho Q \text{ т/сек,} \end{aligned} \quad (24)$$

где переводные множители 10^{-3} и 10^{-6} применяются при переходе от граммов в килограммы или тонны.

Средний расход наносов за ряд лет называется средним многолетним ($R_{ср.мн}$), средний за год — средним годовым расходом взвешенных наносов (R_r).

Суммарное среднемноголетнее количество проносимых рекой наносов, отнесенное к годовому периоду времени, называется нормой годового стока наносов P_r и измеряется в тоннах.

$$P_r = \rho W_0 10^{-6} \text{ т/год,} \quad (25)$$

где W_0 — средний многолетний объем годового стока воды (норма).

Создание водохранилищ на реках изменяет естественный режим стока воды и наносов.

На крупных водохранилищах происходит резкое снижение скорости течения, в результате чего наносы, поступающие вместе со стоком рек, питающих водохранилище, осаждаются в его чаше. При подмыве и обрушении берегов происходит вторичное взмучивание (обусловленное воздействием течений и ветровых волнений на дно). На малых водохранилищах интенсивность заилиения усиливается при наличии органических остатков водной растительности в отложениях. В пустынных районах некоторая часть наносов поступает в водохранилища под действием ветра.

Заилиение — наиболее крупный дефект водохранилищ: оно влечет за собой утрату их регулирующего значения, по мере уменьшения емкостей делает невозможным обеспечение водой потребителей в нужные сроки и в требуемых количествах.

Водохранилища Средней Азии, обслуживающие ирригационные системы, иногда заиляются очень быстро. Так, Первое Тедженское

водохранилище за 10 лет заилилось на 40%, Таш-Кеprinское за 21 год на 75%, за 10 лет почти полностью заилилось водохранилище Фархадской ГЭС.

Продолжительность заилиения определяет срок службы водохранилища и зависит от крупности и количества наносов, состава отложений, слагающих ложе реки, емкости водохранилища, гидрографа стока воды, высоты пика половодья, затопления поймы, уклона водной поверхности, конструкции плотины, порядка эксплуатации водохранилища, величины холостых сбросов. Крупные водохранилища в первые годы эксплуатации практически аккумулируют все наносы.

Водохранилища, работающие в период половодья (паводка) без значительного подпора при большом объеме холостых сбросов воды, задерживают только часть годового стока наносов.

При расчете заилиения и занесения водохранилищ большое значение имеет механический (гранулометрический) состав наносов. Процентное содержание отдельных фракций наносов задается или их средним диаметром, или гидравлической крупностью. Гидравлический метод анализа применяют для частиц диаметром менее 1 мм; для наносов крупнее 1 мм используют сита. Переход от гидравлической крупности к диаметру частиц и обратно ведут по таблицам. Донные отложения классифицируются по гранулометрическому составу. В зависимости от содержания отдельных фракций наносов в % по весу находят тип грунта (классификация Г. А. Петуховой, табл. 6).

ТАБЛИЦА 6

Грунты	$\gamma_{отл}$	Грунты	$\gamma_{отл}$
Илы тонкие	0,7—0,8	Мелкие пески	1,5—1,6
Илы	0,8—0,9	Средние и крупные пески	1,6—1,8
Илы с примесью песка	0,9—1,1	Пески с гравием	1,7—1,9
Мелкие и средние пески заиленные	1,2—1,3	Гравий	1,8—2,1
Средние пески заиленные	1,3—1,5	Галька с гравием	2,0—2,4

Объемный вес отложений находят при достаточном уплотнении без учета содержания органических примесей. При расчете заилиения прудов южной части Украины Н. И. Дроздом предложено определять объемный вес наносных отложений в $т/м^3$ по формуле:

$$\gamma_{отл} = \frac{A}{e} + CT + B, \quad (26)$$

где A , B , C — коэффициенты, зависящие от строения прилегающей к водохранилищам части бассейна (табл. 7);

e — процент органических примесей в наносных отложениях, зависит от зарастания водохранилища; при сильной интенсивности зарастания $e=15-20\%$; при средней $e=10-15\%$; при слабой $e=5-10\%$;

T — период заилиения, лет.

ТАБЛИЦА 7

Грунты	Значение коэффициентов		
	A	B	C
Пески	2,30	0,25	0,002
Глины, тяжелые суглинки	2,25	0,35	0,004
Легкие и средние суглинки	2,00	0,45	0,007

Объемный вес отложений в заиляемых водохранилищах уменьшается в зависимости от содержания органических примесей весьма значительно.

Считают, что заиление водохранилища продолжается до тех пор, пока не восстанавливается транспорт стока наносов из водохранилища в нижний бьеф и в заиленном бьефе не образуется русло по форме и размерам, подобное существовавшему до постройки плотины.

В зависимости от механического состава наносы сортируются по длине подпорного бьефа. Крупные фракции взвешенных и влекомых по дну наносов аккумулируются в зоне первоначального подпора и создают гряду наносных отложений (бар). Наносы мелких фракций более равномерно распределяются по длине водохранилища. При большой протяженности подпорного бьефа ближе к створу плотины выпадают мельчайшие фракции взвешенных наносов, органические примеси и продукты переработки берегов.

С ростом отложений наносов в зоне выклинивания подпора поперечные сечения русла потока уменьшаются, уклоны возрастают до величины, обеспечивающей транспорт наносов, и подпор распространяется вверх по течению.

Происходят взаимосвязанные процессы: перемещение вверх кривой подпора и повышение уклона и связанное с этим увеличение скорости, обеспечивающее влечение вниз наносных отложений.

В первоначальном створе устанавливается незаиляемый уклон. По мере заиления свободная емкость водохранилища уменьшается и часть взвешенных наносов начинает сбрасываться в нижний бьеф.

На горных и предгорных реках необходим детальный учет процессов переформирования русла в верхнем и нижнем бьефах плотины. Верхние бьефы плотин при напорах менее 10 м и уклонах $I > 0,002$ ввиду больших скоростей течения практически не заиляются.

По С. Т. Алтунину, в водохранилищах на горных реках процесс аккумуляции наносов делится на три периода. В первый период занесения в чистом виде не происходит, ему сопутствует заиление. К концу первого периода взвешенные наносы проходят по водохранилищу транзитом, не выпадая из взвеси. Во второй период водохранилище заносится влекомыми по дну наносами, поступающими в период паводка (половодья). Третий период характеризуется полным занесением водохранилища с восстановлением транспорта наносов из верхнего бьефа в нижний по сформированному руслу.

Для каждого периода по приближенным зависимостям строят кривые подпора и на поперечных профилях определяют объемы занесения. Вопросы переформирования верхнего и нижнего бьефов гидроузлов являются самостоятельной проблемой гидротехнического проектирования.

При водохозяйственных расчетах обычно ограничиваются определением объема отложений за отдельные периоды времени для назначения емкости мертвого слоя или расчетом заполнения заданной емкости по годам.

§ 1. Методика расчета заиления водохранилищ

Существуют много методов расчета заиления водохранилищ детальных и приближенных, учитывающих гранулометрический состав наносов или использующих суммарные их характеристики. Во всех методах процесс переноса и аккумуляции наносов связывается со стоком воды, поступающей в водохранилище, и ее сбросом.

Изменение режима стока воды оказывает влияние на режимы стока наносов. Однако изменение и формирование мутности водных масс водохранилища вызывается не только стоковыми течениями. В водохранилищах возникают циркуляционные течения, ветровые волнения, переработка берегов, донные течения насыщенных мелкими фракциями наносов лессовидного происхождения и течения, связанные с режимом работы сооружений.

Все разнообразие факторов трудно учесть при проектировании.

Для крупных гидроузлов проводят лабораторную проверку процесса руслоформирования в верхнем и нижнем бьефах на специально создаваемых моделях.

Основой всех расчетных построений и методов служит уравнение баланса наносов во времени и по длине водохранилища. Разность притока и оттока наносов за расчетный период в начальном и конечном створах водохранилища определяет объем их аккумуляции.

При расчете заиления водохранилища детальным методом по участкам подпорного бьефа вычисляют изменение мутности и состава наносов от начального к последующему профилю и объем отложившихся наносов на участке за расчетный период. Заиление на участке от предпоследнего профиля до последнего находят как разность объема отложений всего водохранилища и части, ограниченной предпоследним створом.

При расчете заиления водохранилищ используются данные мутности, гранулометрического состава наносов, расходов воды, параметров водохранилища, объемного веса отложений. В расчетах применяются формулы транспортирующей способности как при наличии, так и при отсутствии данных измерений. Первичными источниками сведений о мутности потока являются гидрологические ежегодники. Систематизированные данные наблюдений за стоком наносов до 1962 г. опубликованы в изданных Гидрометеослужбой сборниках «Основные гидрологические характеристики».

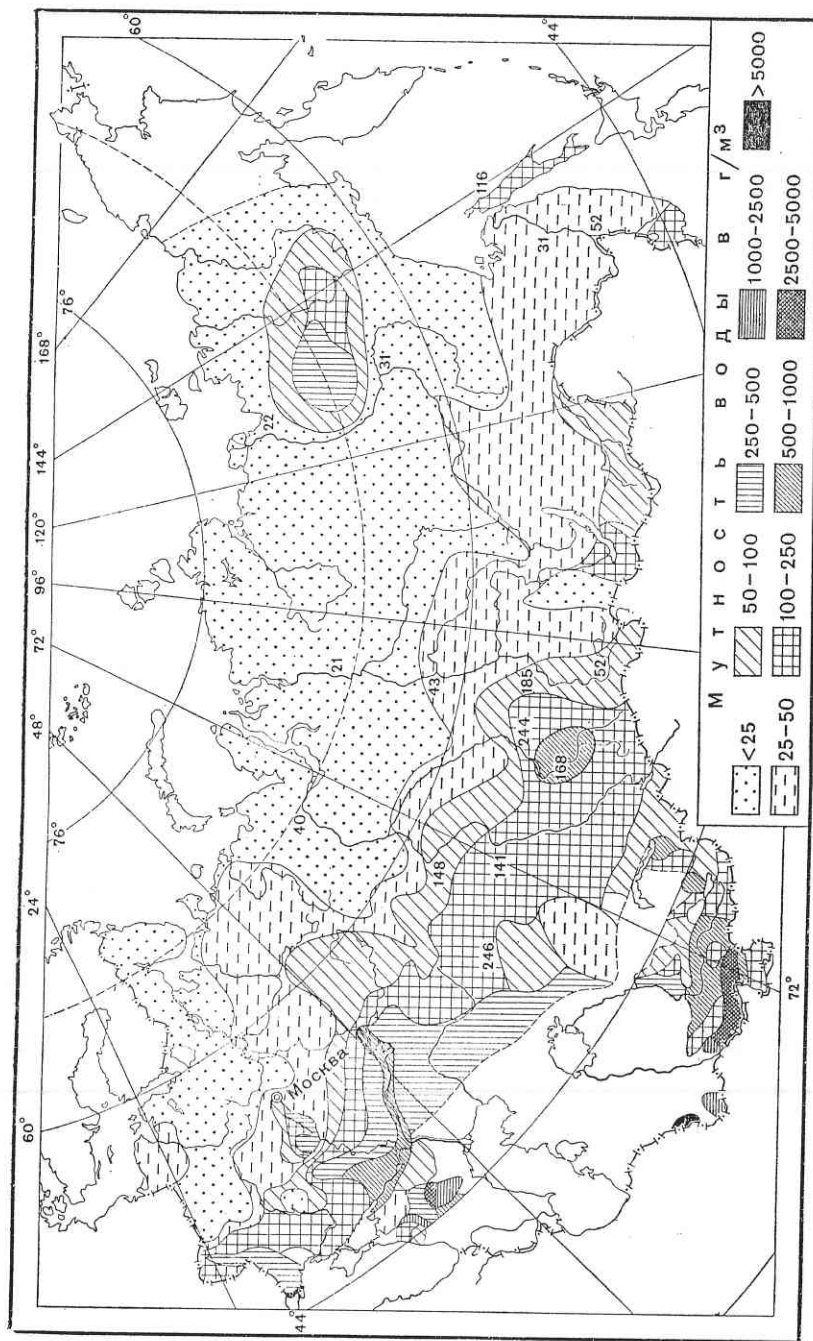


Рис. 65. Карта средней мутности воды рек СССР.

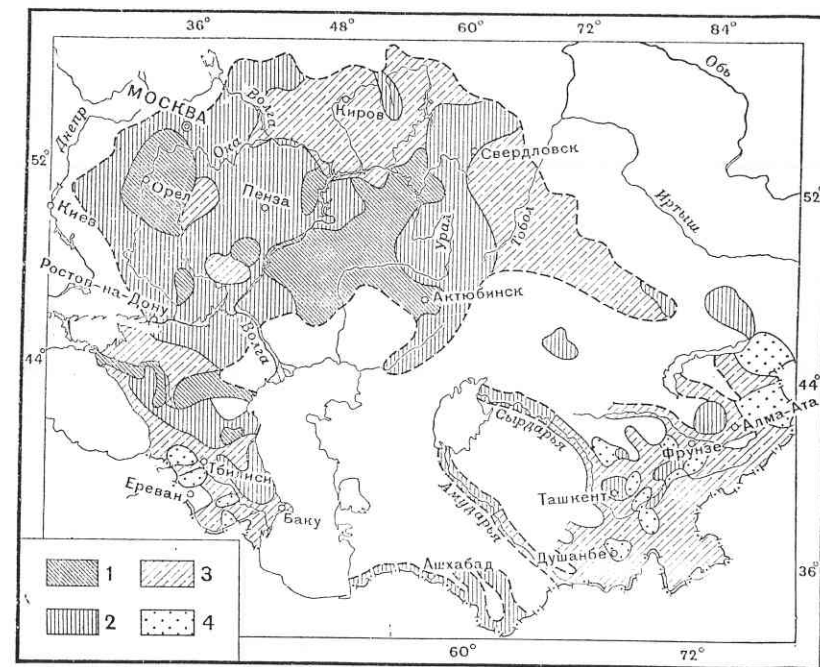


Рис. 66. Схематическая карта крупности фракций $< 0,05$ мм взвешенных наносов:
1—90%; 2—90—75%; 3—75—50%; 4— $< 50\%$.

При отсутствии данных измерений наносного режима реки в створе водохранилища среднюю многолетнюю мутность воды приближенно определяют по карте Г. И. Шамова (рис. 65). Карта применяется для неизученных рек с площадью водосбора от 500 км^2 до 20 тыс. км^2 . Уточненные карты средней мутности публикуются в монографиях «Ресурсы поверхностных вод», издаваемых Гидрометеослужбой.

Г. И. Шамовым составлена карта крупности взвешенных наносов, которая позволяет приближенно оценить гранулометрический состав наносов для территорий европейской части СССР, Кавказа и Средней Азии (рис. 66). Мутность малых водотоков с площадью водосбора менее 200 км^2 вычисляют как $\rho_m = k\rho$. Поправочный коэффициент k к мутности рек ρ по рекомендации ГГИ для центральных черноземных областей, Украины и Северного Кавказа находят по таблице 8.

Балансовым расчетом находят объем заиления водохранилища между начальным и конечным (у плотины) створами. Расход взвешенных наносов, поступающих в водохранилища, обусловлен притоком воды, а расход наносов в конечном створе связан с работой сооружений и холостыми сбросами. Объем заиления (аккумуля-

ТАБЛИЦА 8

Площадь водосбора	Центральные черноземные области (К. П. Воскресенский)	Украина (Н. И. Дрозд)	Северный Кавказ (К. Н. Лисицина)
2	30	30	40
5	15	15	20
10	10	10	13
50	5	5	5
100	3	—	3
200	1	—	1
≥1000	1	1	1

ции наносов) за Δt интервал времени выражается в $м^3$:

$$V_{ab} = \frac{10^{-3}}{\gamma_{отл}} (R_{в.н} - R_{в.к}) \Delta t, \quad (27)$$

где $\gamma_{отл}$ — объемный вес отложений, $т/м^3$;
 Δt — расчетный интервал времени;
 $R_{в.н}$ и $R_{в.к}$ — расходы взвешенных наносов, средние за период Δt , в начальном и конечном створах водохранилища, $кг/сек$.

Рекомендуется делить год на 3—4 расчетных интервала времени в зависимости от соотношений между расходами стока, отдачи и сбросов. При полной аккумуляции взвешенных наносов в водохранилище $R_{в.к} = 0$. Аналогично находят объем отложений донных наносов крупных фракций в $м^3$:

$$V_{a.д} = \frac{10^{-3}}{\gamma_{отл}} (R_{д.н} - R_{д.к}) \Delta t, \quad (28)$$

где $R_{д.н}$ и $R_{д.к}$ — расход донных наносов, средний за период в начальном и конечном створах, $кг/сек$.

Балансовые расчеты проводят вначале для учета заиления водохранилища за первый год его работы. При наличии данных о стоке наносов и их механическом составе балансовые расчеты выполняют по отдельным фракциям, затем их суммируют и находят общий объем отложений. При балансовых расчетах заиления водохранилища используют формулы транспортирующей способности потока, применяют эмпирические соотношения для оценки транспорта наносов и его изменения по длине водохранилища. При отсутствии данных для оценки заиления водохранилища используют критерий наносоудерживающей способности.

Для расчета заиления из формул транспортирующей способности, учитывающих гранулометрический состав наносов, наиболее известны формулы А. Г. Хачатряна и А. В. Караушева.

Формула А. В. Караушева выведена на основе диффузионной теории взвешивания наносов и рекомендована для расчетов при заилении водохранилищ. Транспортирующую способность ρ_t находят:

$$\rho_t = \Gamma \rho_{взм}, \quad (29)$$

где $\rho_{взм}$ — мутность взмыва;

Γ — гидромеханический параметр, учитывающий гранулометрический состав наносов.

Как мутность взмыва, так и гидромеханический параметр могут быть вычислены по формулам.

А. В. Караушев разработал номограммы для вычисления мутности взмыва и гидромеханического параметра. Мутность взмыва (рис. 67) равна:

$$\rho_{взм} = f(C, H, v_{ср}),$$

где C — коэффициент Шези;

$v_{ср}$ — средняя скорость, $м/сек$;

H — средняя глубина на участке, $м$.

Параметры N и η входят в формулу для вычисления мутности взмыва на номограмме. Параметр η и N находится как

$$\eta^2 = \frac{0,53C - 4,1}{C - 20}; \quad (30)$$

$$N = \frac{MC}{g}, \quad (31)$$

где g — ускорение силы тяжести;

M — параметр, равный $\varphi(C)$;

при $10 \leq C \leq 60$ $M = 0,7C + 6$;

при $C > 60$ $M = 48 = \text{const}$.

Мутность взмыва рассчитывают по фракциям при наличии гранулометрического состава транспортируемых наносов. Если задан состав донных отложений, то определяется и их взвешивающая часть.

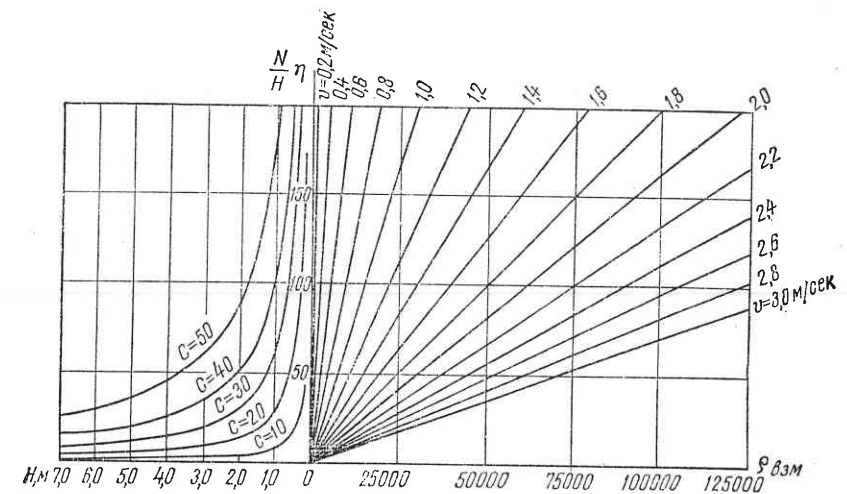


Рис. 67. График для определения мутности взмыва $\rho_{взм}$ по формуле А. В. Караушева.

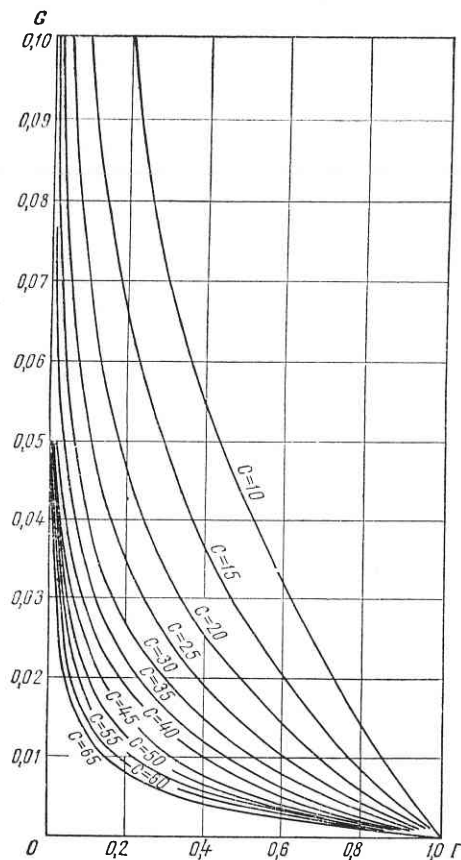


Рис. 68. Графики функции $G(G, C)$.

Гидромеханический параметр Γ определяют с использованием таблиц функций, его определяющих. Для приближенных расчетов по фракциям параметр Γ находят по графикам (рис. 68), которыми пользуются и при вычислении гидромеханического параметра по средней гидравлической крупности наносов:

$$\Gamma = \varphi(G, C), \quad (33)$$

где G — безразмерная величина, равная

$$G = \frac{u}{v_{cp}}; \quad (34)$$

и — гидравлическая крупность транспортируемых наносов м/сек. В вычисленное значение ρ_t при наличии данных о мутностях вводят поправку a , равную

$$a = \frac{\rho_{i \text{ изм}}}{\rho_{i \text{ выч}}},$$

где $\rho_{i \text{ изм}}$ и $\rho_{i \text{ выч}}$ — значения измеренной средней мутности за интервал времени и вычисленной транспортирующей способности. Выбор расчетного значения мутности про-

водится в зависимости от возможного срока заиления водохранилища. Если срок полного заиления емкости водохранилища или мертвого объема ориентировочно превышает для аридных и горных районов 25—30 лет, а для равнинных рек других зон — 15—20 лет, то расчет выполняется по среднему многолетнему расходу наносов или стоку их.

В этом случае нет необходимости для наносов вычислять статистические параметры ряда C_s , C_r и учитывать их цикличность. Выбранный в качестве расчетного гидрограф стока воды приводится к норме. При небольших сроках заиления его расчет усложняется и проводится по расчетному году заданной обеспеченности, по стоку воды и наносов. Наиболее неблагоприятные условия заиления в этом случае создаются при отсутствии связи между стоком воды и наносов. Гидрограф стока воды при расчете приводится к расчетной обеспеченности.

Расчет объема заиления малых водохранилищ и прудов. При отсутствии данных о режиме наносов и гранулометрическом составе

годовой сток наносов P_r находят косвенным путем с использованием карты мутности Г. И. Шамова. Годовое количество отложившихся в водохранилище наносов зависит от годового стока наносов P_r (м/год) и так называемой наносоудерживающей способности $\bar{P}_a$ (табл. 9). Способность задерживать ту или другую долю годового стока наносов в водохранилище зависит от относительной емкости водохранилища.

Относительной емкостью водохранилища называется частное от деления его емкости при НПУ на норму стока воды реки, питающей водохранилище. Относительная емкость (коэффициент емкости) равен:

$$\beta_{\text{нпу}} = \frac{V_{\text{нпу}}}{W_0} \quad (35)$$

Водохранилища большой относительной емкости ($\beta_{\text{нпу}} > 0,6$) аккумулируют практически все наносы. Водохранилища средней относительной емкости ($0,15 < \beta_{\text{нпу}} < 0,6$) в зависимости от режима работы, местных особенностей могут аккумулировать от 100 до 70% поступающих наносов. Часть наносов попадает в нижний бьеф при холостых сбросах воды во время паводка. При водохранилищах малой относительной емкости ($\beta_{\text{нпу}} < 0,15$) учитывают уменьшение интенсивности заиления во времени.

Отношение годового количества отложившихся в водохранилище наносов P_a к среднему годовому стоку наносов P_r называется наносоудерживающей способностью $\bar{P}_a$.

$$\bar{P}_a = \frac{P_a}{P_r}, \quad (36)$$

или

$$P_a = \bar{P}_a P_r \text{ м/год.}$$

ТАБЛИЦА 9

Территория	Характеристика состава наносов	$\bar{P}_a$ наносоудерживающая способность при относительной емкости β							
		1,0	0,95	0,80	0,70	0,50	0,30	0,10	0,05
Украина	Глинистые	—	0,99	0,98	—	0,96	0,94	0,84	0,70
	Мелкопесчаные	—	—	—	—	—	—	0,99	0,85
Северный Казахстан	Илисто-глинистые	1	0,96	0,86	0,78	0,58	0,32		

Объем годового заиления (аккумуляция наносов) определяют как

$$V_a = \frac{1}{\gamma_{\text{отд}}} P_a. \quad (37)$$

Если вес отложений дан в килограммах, то переход к кубическим метрам осуществляется по формуле:

$$V_a = \frac{10^{-3}}{\gamma_{отл}} P_a. \quad (38)$$

Множитель 10^{-3} учитывает переход от килограммов в тонны. Объемный вес отложений наносов приведен в таблице 6.

При наличии фракционного состава наносов для расчета объема заиления малых водохранилищ аридной зоны и водохранилищ на водотоках с кратковременным паводком Караушев предложил зависимость и разработал графики. Расчет проводят по фракциям с использованием критерия наносоудерживающей способности.

Детальные расчеты заиления по участкам протяженности водохранилища выполняют по ряду сложных методов (методы К. И. Росинского и И. А. Кузьмина, В. С. Лапшенкова, А. В. Караушева и др.).

Расчет отложений влекомых наносов в водохранилище. Расходы влекомых наносов, осредненные за интервал времени, вычисляют для начального и конечного створов водохранилища по формуле И. В. Егiazарова:

$$R_d = 24Q \frac{v}{C \sqrt{H}} \left(\frac{d_{\max}}{d_{cp}} - 1 \right) \text{ кг/сек}, \quad (39)$$

где расходы Q глубины H и средние скорости v , вычисляемые для створов при наполнении водохранилища до НПУ;

$$v = \frac{Q}{\omega}; \quad H = \frac{\omega}{B}.$$

Наибольший диаметр частицы, перемещаемой при данном режиме, определяют по гранулометрической кривой или по формуле Г. И. Шамова для начальной скорости влечения обоих створов:

$$d_{\max} = \frac{v^3}{50,65 H^{1/2}}. \quad (40)$$

Средний диаметр частиц определяют по гранулометрической кривой наносов, находящихся в движении при заданном расходе. Зная расходы донных наносов в начальном и конечном створах, вычисленные по формуле (39), находят объем отложений донных наносов.

Способы расчета продолжительности полного заиления и его объемов по годам. Хронологический ход заиления определяют по методам Г. И. Шамова, В. С. Лапшенкова и С. Т. Алтунина. Первые два метода основаны на предположении, что интенсивность заиления затухает во времени по мере уменьшения емкости водохранилища. Расчет проводят по годовым отрезкам времени с использованием осредненных величин расхода воды и наносов.

Объем отложений взвешенных наносов за первый год суммируют с объемом отложений донных наносов за тот же год и используют для расчетов хода заиления и занесения водоема по формулам Г. И. Шамова:

$$V_{at} = V_{a.пр} (1 - a^t),$$

где $V_{a.пр}$ — предельно заполняемый наносами объем водохранилища (m^3), по достижению которого заиление прекращается;
 a — параметр, характеризующий относительное заиление водохранилища в первый год;
 t — число лет.

$V_{a.пр}$ приближенно определяют по формуле:

$$V_{a.пр} = V_{нпу} \left[1 - \left(\frac{\Omega_p}{\Omega_n} \right)^{1,7} \right] m^3, \quad (41)$$

где $V_{нпу}$ — полный объем водохранилища;

Ω_p — площадь поперечного сечения русла реки в естественных условиях при пропуске $3/4$ расчетного максимального расхода, m^2 ;

Ω_n — наибольшая площадь поперечного сечения верхнего бьефа на ближайшем к плотине участке, m^2 .

Объем заиления в первый год работы водохранилища вычисляют по формуле:

$$V_{a,1} = \frac{P_r}{\gamma_{отл}} \left[1 - \left(\frac{\Omega_p}{\Omega_n} \right)^n \right] m^3, \quad (42)$$

где P_r — годовой сток наносов, $m/год$;

$\gamma_{отл}$ — объемный вес наносных отложений, m/m^3 ;

n — показатель степени находят в зависимости от уклона реки.

Уклон реки:	< 0,0001	0,0001—0,001	0,001—0,01
n	1—0,8	0,8—0,5	0,5—0,33

Параметр a представляет относительное заиление в первый год эксплуатации или величину, обратную аккумулярующей способности водохранилища:

$$a = 1 - \frac{V_a}{V_{a.пр}}. \quad (43)$$

Расчет проводят в табличной форме (табл. 10).

Таблица 10

t лет	a^t	$(1 - a^t)$	$V_{at} = V_{a.пр} (1 - a^t)$	$P\% = \frac{V_{at}}{V_{a.пр}} 100$	$V_{св} = V_{a.пр} - V_{at}$
1	2	3	4	5	6

Расчет заканчивают, когда объем заиления V_{at} становится равным предельно заиляемому объему, а свободная незаиленная часть

водохранилища $V_{св}$ — близкой к емкости русла до постройки водохранилища, обеспечивающей пропуск расчетного расхода паводка.

Расчетную зависимость, предложенную В. С. Лапшенковым, для заиления по годам применяют при скоростях течения в водохранилище $V_{ср} > 0,15 \div 0,20$ м/сек.

Объем аккумулярованных в подпертом бьефе наносов за период эксплуатации (t лет) находят по зависимости:

$$V_{at} = V_{a.пр} \left(1 - e^{-\frac{t}{E}} \right), \quad (44)$$

где $e = 2,73$ — основание натуральных логарифмов;

E — характеристика заиляемости подпертого бьефа.

Предельно заиляемый объем находят как разность объема подпертого бьефа при НПУ и объема русла, который сформируется после заиления:

$$V_{a.пр} = V_{нпу} - V_p, \quad (45)$$

где V_p — объем русла, определяемый по формуле:

$$V_p = LBH, \quad (46)$$

в которой L — длина водохранилища до выклинивания кривой подпора в конце периода заиления;

H — средняя глубина, м;

B — ширина, рассчитывается по формуле С. Т. Алтунина:

$$B = (kH)^{\frac{1}{m}}. \quad (47)$$

Средняя глубина равна:

$$H = \left(\frac{3300 Q^3 n^3}{k^{3/2} \rho u} \right)^{\frac{1}{4 + 3y + \frac{3}{m}}}, \quad (48)$$

где n — коэффициент шероховатости русла;

ρu — нагрузка потока взвешенными потоками по А. Н. Гостунскому;

ρ — транспортирующая способность потока, кг/м³;

u — гидравлическая крупность, м/сек;

y — показатель степени в формуле Н. П. Павловского для вычисления коэффициента Шези;

m и k — параметры С. Т. Алтунина, учитывающие форму русла (часто принимают $m = 0,5$, $k = 3$).

Характеристика заиляемости E вычисляется в виде:

$$E = \frac{\gamma_{отл} V_{a.пр}}{\epsilon' P}, \quad (49)$$

где P — сток взвешенных наносов за период времени;

ϵ' — доля осадений наносов в начальный период; величина зависит от состава наносов, расхода воды и топографических условий;

$\epsilon' P$ — остающаяся в подпорном бьефе часть стока наносов.

По С. Т. Алтунину ϵ' может быть ориентировочно принята в функции от $\frac{V_p}{V_{a.пр}}$ по таблице 11.

ТАБЛИЦА 11

$\frac{V_p}{V_{a.пр}}$	0—0,0375	0,037—0,073	0,073—0,13	0,13—0,158	0,158—0,415
ϵ'	1—0,998	0,998—0,99	0,99—0,95	0,95—0,537	0,537—0,150

Мутность в конечном створе вычисляют по зависимости:

$$\rho_{kt} = \rho_{k0} + \frac{V_{at}}{V_{a.пр}} (\rho_{н0} - \rho_{k0}), \quad (50)$$

где ρ_{k0} — мутность в конечном створе в начальный момент времени;

$\rho_{н0}$ — мутность в начальном створе в начальный момент времени.

Объем, остающийся свободным от заиления, равен:

$$V_{св} = V_{a.пр} - V_{at}. \quad (51)$$

В конце расчета свободный объем равен объему устойчивого русла, вычисленному ранее.

Расчет удобно проводить в табличной форме (табл. 12).

ТАБЛИЦА 12

t лет	E	$\frac{t}{E}$	$e^{-\frac{t}{E}}$	$1 - e^{-\frac{t}{E}}$	$V_{at} = V_{a.пр} (1 - e^{-\frac{t}{E}})$	$P\%$	$V_{св}$
1	2	3	4	5	6	7	8

§ 2. Понятие о переформировании берегов водохранилища

Процессы размыва и обрушения берегов водохранилищ, продолжающиеся до образования устойчивого профиля береговой отмели, называют переформированием или переработкой берега. В результате переработки берега водохранилища делаются более пологими, водная поверхность увеличивается.

При хозяйственном освоении прибрежной зоны водохранилищ следует учитывать возможность переработки берегов по срокам эксплуатации, для чего проводят расчет вероятности береговых переформирований.

Так как процесс переформирования берегов достаточно длительный, а факторы, влияющие на него, многочисленны, он изучен относительно слабо.

На основании научных исследований, проведенных Б. А. Пышкиным, Н. Е. Кондратьевым, Е. Г. Кочугиным, Г. С. Золотаревым и др., предложены различные приемы расчета береговых переформирований.

Переработка берегов имеет большое значение на крупных водохранилищах с большой протяженностью береговой полосы. На интенсивность переформирования берегов, кроме ветрового волнения, оказывают влияние: колебания уровней при сработке и заполнении емкости; состав грунтов, слагающих берег и его профиль; гидрогеологические условия; скорость течения вдоль берега, режим движения влекомых по дну наносов. Объем наносов от переработки берегов достигает часто 40% общего объема заиления водохранилищ.

При вычислении суммарного объема твердого стока, аккумулируемого в водохранилище, необходимо учитывать переработку берега. Размытый грунт перемещается под воздействием поперечных скоростей, вызванных волнением, в более глубокие зоны водохранилища и там отлагается, уменьшая емкость.

В результате переработки берега формируется устойчивый профиль береговой отмели, достаточно широкой и пологой, чтобы защитить берег от дальнейшего размыва. Устойчивое равновесие отмели достигается при снижении скорости или установлении баланса вкатывающихся и скатывающихся с откоса частиц грунта.

Нормами рекомендуется проводить прогноз наиболее вероятных береговых переформирований на заданный срок по методике Н. Е. Кондратьева. Подробно для различных расчетных условий эта методика излагается в СН 92—60.

Положение прогнозируемого профиля береговой линии относительно профиля берега в естественных условиях находят путем совмещения профилей до тех пор, пока не достигается равенство призмы размыва и отложения.

§ 3. Мероприятия по уменьшению заиления

Для сокращения заиления водохранилища необходимо:

уменьшать и предотвращать ветровую и водную эрозию на водосборе (почвозащитные севообороты, прерывистые борозды, полосное размещение культур, залужение крутых склонов, облесение и закрепление оврагов, балок, берегов водохранилища, культуртехнические мероприятия, террасирование крутых склонов);

устраивать в верховьях рек крупные емкости для задержания наносов и селевых потоков, снижать размывающую способность потока сквозными сооружениями (заилителями).

Целесообразно для этих же целей каскадное размещение водохранилищ с перекрытием подпорного бьефа нижерасположенной плотиной, а также недопущение образования размываемых участков и использование периода паводков для сброса наносов из водохранилища.

Рекомендуется устраивать внеусловные наливные водохранилища, наполняемые и срабатываемые через деривационные каналы; пропускать избыточную часть паводков в обход водохранилища; взмучивать и рыхлить отложения при промывках для облегчения сброса их в нижний бьеф; применять землесосы и землеройные механизмы для очистки ложа водохранилища от наносов; создавать в водо-

хранилищах большие емкости на случай заиления, занесения; использовать плотины с большими донными отверстиями для гидравлических промывок; возводить плотины этапами по мере заиления, занесения.

Глава V. ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

При расчетах регулирования стока в условиях проектирования решаются различные задачи. Приемы расчетов подразделяют на три группы, что соответствует исторической последовательности их разработки.

В первую группу включают балансовые расчеты, которыми решают так называемые прямую и обратную задачи.

В прямой задаче находят полезную емкость водохранилища при заданном притоке, плановой отдаче, нормах потерь воды и начальном наполнении. В необходимых случаях задают и правила регулирования. Наполнением считается запас воды в водохранилище на любой момент времени. Полученная полезная емкость должна обеспечивать стопроцентную бесперебойность отдачи за период регулирования. Избытки стока над потреблением сбрасывают без использования на полезные цели в нижний бьеф. Подобные сбросы называют холостыми. Период, в течение которого происходит заполнение емкости и увеличение объемов наполнения, называют иногда накоплением. Сработка соответствует периоду частичного или полного опорожнения водохранилища.

В обратной задаче определяют фактические отдачи при заданной емкости и других условиях регулирования. В задачах данной группы обеспеченность отдачи за период регулирования непосредственно расчетом не устанавливают даже при правильном выборе годового стока и внутригодового распределения.

Вторая группа приемов расчета объединяет ряд методов. При решении задач используют обобщенные характеристики стока C_p , C_s и в необходимых случаях коэффициент корреляции величин стока, смежных по времени. Между отдачей, емкостью и процентом обеспеченности нормальной годовой отдачи устанавливают связи в различной их комбинации. Условия регулирования задают, процент обеспеченности отдачи или определяют, или тоже задают. При расчетах применяют относительные величины емкости и отдачи в долях среднегогодового стока. Приемы данной группы широко используют при проектировании.

Третья группа приемов характеризуется тем, что все результаты регулирования определяют в виде кривых обеспеченности (конечные наполнения, сбросы, фактические отдачи, дефициты отдачи, мощность, напоры). При расчете не ограничиваются только определением процента обеспеченности нормальной годовой отдачи или ее назначением, а выясняют весь диапазон возможных колебаний отдачи, наполнений сбросов при различных вариантах, сочетаний стока начальных наполнений и правил регулирования. При данной постановке задач наиболее полно используют вероятностные приемы расчета, учитывают

возможные дефициты и перебор отдач по величине, а также технико-экономические показатели.

Переход от балансовых расчетов, основанных на использовании многолетних стоковых рядов, к вероятностным способам их оценки в практике проектирования был сделан в 1930 г. С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем при создании ими так называемого первого метода расчета многолетнего регулирования стока. В последующие годы появились: метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1935 г.); метод цепных вероятностных расчетов А. Д. Саваренского (1938 г.), аналитические приемы, основанные на использовании интегральных уравнений регулирования стока (П. Моран, Н. А. Картвелишвили, В. А. Грузинов, В. А. Киктенко); комбинированная методика расчета регулирования при однократном режиме работы водохранилища Ш. Ч. Чокина; расчетные графики (Я. Ф. Плешкова, А. Д. Саваренского, Ш. Ч. Чокина, И. В. Гуглия, Г. Г. Сванидзе); методы, основанные на статистических испытаниях (Г. П. Иванов, А. Д. Саваренский, Г. Г. Сванидзе).

Методы расчетов регулирования с учетом коррелятивных связей между величинами стока смежных интервалов времени и изменчивости условий регулирования успешно развиваются. Дальнейший прогресс в реализации этих методов тесно связан с внедрением электронных цифровых вычислительных машин в практику проектирования.

Балансовые таблично-цифровые расчеты проводят при решении всех задач регулирования. На них в основном базируются расчеты сезонно-годового и многолетнего регулирования, выполняемые по длительным календарным рядам гидрометрических наблюдений, в других случаях балансовые таблично-цифровые расчеты имеют вспомогательное значение. Балансовые расчеты можно выполнять и графическим путем. В зависимости от видов регулирования периоды времени для самостоятельных балансовых расчетов изменяются в широких пределах от сезона до суток и часов.

Достоинство таблично-цифровых балансовых расчетов в их точности и простоте, возможности применения электронных цифровых вычислительных машин и механизации в условиях проектирования и эксплуатации. При ручном подсчете таблично-цифровые расчеты трудоемки.

Для того чтобы сделать балансовые расчеты более наглядными и облегчить выбор вариантов по их результатам, необходимо дополнительно составлять графики, иллюстрирующие ход регулирования стока и работу водохранилища.

Формы расчетных таблиц весьма разнообразны, они отличаются главным образом по способам учета потерь воды из водохранилища. Наиболее распространены два способа учета.

Графические расчеты имеют большую наглядность и облегчают понимание самого процесса регулирования стока. При графических расчетах используются гидрографы стока и отдачи, календарные интегральные суммарные кривые, графики потерь, кривые обеспеченности и продолжительности.

Расчет по таблично-цифровым или графическим способам удобно проводить, начиная с даты перехода от лимитирующего маловодного

периода к периоду повышенной водности. Момент перехода соответствует равенству стока и отдачи и условию, что в последующем сток превышает отдачу. За начальное наполнение принимают мертвый объем или условно нулевое наполнение.

Для уяснения методики балансового расчета (первый тип задачи) на одном рисунке совмещают гидрографы стока и отдачи в единых масштабах расходов и времени. Рассмотрение рисунка 69 позволяет сделать следующие выводы.

За время от t_2 до t_3 расходы отдачи превышают приток. Заштрихованная площадь равна объему воды, недостающему для поддержания заданной отдачи, или дефициту стока. Дефицит стока вычисляют планиметрированием этой площади или суммированием разностей расходов отдачи и стока. Дефицит стока обозначают через Δd_1 .

Площадь с горизонтальной штриховкой, измеренная с учетом масштабов времени и расходов, дает избыточный объем воды над заданным расходом отдачи и называется избытком стока. Обозначается избыток стока как Δb_1 . Для перераспределения стока на заданный расход отдачи необходимо иметь превышение объема избытка стока над дефицитом $\Delta b_1 > \Delta d_1$.

Полезная емкость определяет предельную верхнюю границу возможного наполнения водохранилища и отметку НПУ в условиях нормальной эксплуатации. Чередование периода накопления воды и последующей сработки называется тактом работы (однотактная работа водохранилища).

Если работа водохранилища состоит из двух периодов накопления и последующих за каждым из них периодов сработок, имеет место двухтактный режим. При двухтактной работе водохранилища накопление воды и опорожнение водохранилища зависит от соотношения между избытками и последующими за ними дефицитами стока.

В случае если каждый избыток больше последующего за ним дефицита $\Delta b_1 > \Delta d_1$ и $\Delta b_2 > \Delta d_2$ (рис. 70, а), то весь расчетный период регулирования делится на два не зависящих друг от друга цикла регулирования.

Если $\Delta d_1 > \Delta d_2$, то полезный объем выбирается по максимальному дефициту, равному Δd_1 ; в случае, когда $\Delta d_2 > \Delta d_1$, полезный объем находится как $V_{плз} = \Delta d_2$.

Если соотношение между избытками и последующими за ними дефицитами стока при двухтактной работе водохранилища выражается следующими неравенствами $\Delta b_1 > \Delta d_1$, но $\Delta b_2 < \Delta d_2$, то возможны два расчетных случая.

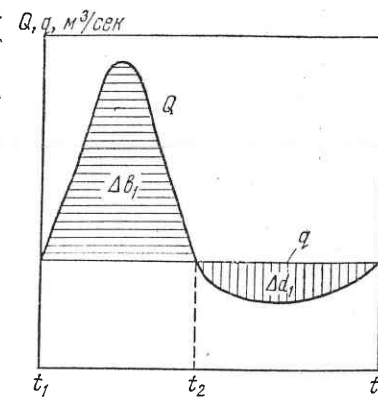


Рис. 69. Совмещенный график притока и отдачи.

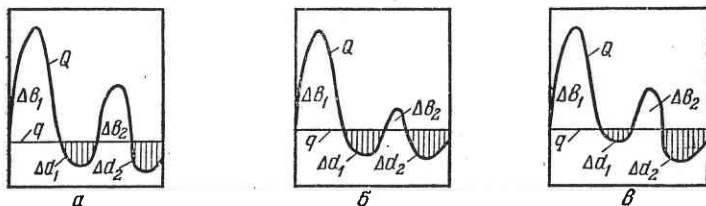


Рис. 70. Двухтактная работа водохранилища:
а — с независимым; б — с зависимым; в — с промежуточно-зависимым циклами.

1. При условии, когда $\Delta d_1 > \Delta b_2$ (рис. 70, б), то есть объем первого дефицита стока больше последующего за ним избытка, работу водохранилища нельзя рассматривать как независимую. При накоплении воды за счет первого избытка делается необходимый запас не только для ликвидации дефицита стока Δd_1 , но и для покрытия отрицательной разности между последующими избытком и дефицитом. Полезную емкость водохранилища находят как сумму двух дефицитов стока с учетом восстановления их избыточным стоком междефицитного периода.

$$V_{\text{плз}} = \Delta d_1 + \Delta d_2 - \Delta b_2, \quad (52)$$

где Δd_1 и Δd_2 — дефициты стока, следующие за избытками;

Δb_2 — избыточный объем воды над заданным расходом отдачи в период между двумя дефицитами.

Рассмотренный случай соответствует двухтактной работе с зависимым циклом.

2. Если $\Delta b_2 > \Delta d_1$ (рис. 72, б), то есть избыток стока больше предыдущего дефицита стока, то в этом случае необходимо запастись водой из первого по ходу времени избыточного стока Δb_1 , но полезная емкость определяется объемом максимального дефицита $V_{\text{плз}} = \Delta d_2$. Накопление в первый период избыточного стока также будет зависеть от второго дефицита, но работа водохранилища имеет другой режим. Условно данный режим накоплений и сработок называется промежуточным, так как восстановление происходит на большую величину при зависимом в целом цикле.

При любых вариантах правил регулирования стока холостые сбросы ограничены условиями, исключающими опасность наводнений в нижнем бьефе. Подачу воды в нижний бьеф водохранилища не полностью прекращают.

§ 1. Балансовые таблично-цифровые расчеты

Формы таблиц весьма разнообразны и носят индивидуальный характер. Различают два способа учета потерь. Все исходные данные принимают в единицах объема, расчетные интервалы времени берут равными. Сток и отдача совпадают по величине на подъеме паводка с началом расчетного интервала времени в редких случаях, поэтому

за начальную принимают дату, когда сток превышает отдачу. При мелких интервалах времени дату начала расчета определяют точнее.

Табличный расчет по первому способу учета потерь (прямая задача) выполняют в два этапа. Вначале определяют полезную емкость водохранилища, наполнение и холостые сбросы по принятому варианту правил регулирования без учета потерь при заданных условиях, а затем расчет повторяют с учетом потерь до их стабилизации.

Сопоставлением стока и отдачи по интервалам времени находят плюсовые и минусовые разности стока и отдачи. Разности со знаком плюс соответствуют избыткам стока, минусовые — дефицитам.

При однократной работе водохранилища начало расчета совпадает с окончанием периода дефицитов и соответствует дате перехода к избыточному стоку. Полезный объем водохранилища равен объему дефицитов.

При двухтактной работе избытки и дефициты расчетных интервалов времени суммируют по группам. Суммирование проводят отдельно для избытков и дефицитов. Хронологически связанные избытки или дефициты стока по интервалам времени объединяют в группы. Группа может состоять из одного или нескольких хронологически связанных дефицитов стока или избытков.

Если разность стока и отдачи за интервал времени равна нулю, ее можно включать в любую группу. По соотношениям объемов избыточного стока и дефицитов, объединенных в группы, назначают начало расчета и полезный объем водохранилища.

При вычислении полезной емкости водохранилища с двухтактной работой начало расчетов совпадает с датой полной сработки водохранилища. Разность объемов стока и отдачи за период, взятая без учета знака, равняется объему холостого сброса.

Построение графиков результата регулирования, отдач, наполнений и сбросов проводят по вариантам правил регулирования на основе данных таблично-цифрового расчета. Графики строят в прямоугольных координатах; на оси абсцисс откладывают время, на оси ординат средние расходы или объемы по расчетным интервалам времени в принятых масштабах, позволяющих представить работу водохранилища в наглядной форме. Графики могут быть различными по форме.

При равномерной отдаче строят совмещенные гидрографы стока и отдачи, при ступенчатой отдаче — разности стока и отдачи. Линия равномерной отдачи расчленяет гидрограф стока на две части: избытки и дефициты; то же происходит и на графике разности стока и отдачи при неравномерной отдаче. Положительные разности соответствуют избыткам, отрицательные — дефицитам стока. Линию отдачи в обоих случаях принимают за мертвый объем, или нулевое наполнение. От этой линии вверх по шкале ординат откладывают полезный объем и проводят параллельную линию, которая соответствует полной емкости водохранилища.

Конечные и начальные наполнения изменяются в пределах от мертвого объема до полной емкости, то есть находятся между параллельными прямыми. Когда имеются сбросы за интервал времени и конечное

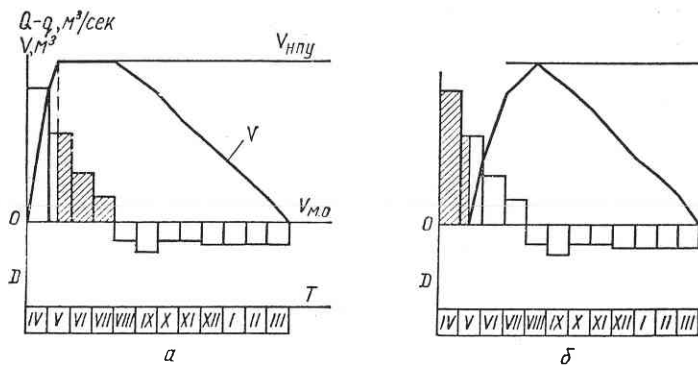


Рис. 71. Графики работы водохранилища по вариантам регулирования:
а — первый; б — второй (заштрихован — сброс).

наполнение равно полной емкости, графически находят даты начала сбросов.

Конечные точки графика опираются на линию мертвого объема. На рисунке 71 показано построение графика работы водохранилища по двум вариантам правил регулирования без учета потерь. На графике по оси ординат отложены разности стока и отдачи и наполнения водохранилища. Окончательное определение полезного объема водохранилища с учетом потерь проводят таблично-цифровым расчетом с постепенным приближением до стабилизации этого объема. Потери воды из водохранилища требуют соответственного увеличения емкости и проверки возможности удовлетворения отдачи за период регулирования.

Если сток значительно превосходит по величине отдачу, можно учет потерь воды проводить только за время сработки водохранилища.

Объемы потерь воды вычисляют по расчетным интервалам времени, которые приняты для стока и отдачи. Чтобы определить объемы потерь воды по интервалам времени, нужно знать норму потерь и параметры водохранилищ (средняя площадь и соответствующая ей емкость).

Средний объем равен полусумме начального и конечного наполнений за расчетный интервал времени.

Площадь зеркала водохранилища находят по объемной или топографической характеристикам.

Полезную емкость и режим работы водохранилища уточняют по принятому для учета потерь воды варианту правил регулирования. Недостатком расчета является приуменьшение объема потерь и полезной емкости водохранилища в первом приближении. Если потери воды из водохранилища большие, до окончательной стабилизации полезной емкости нужно сделать несколько приближений.

Таблично-цифровой расчет полезной емкости водохранилища с учетом потерь воды аналогичен расчету без их учета. При расчете соблюдают условие бездефицитного удовлетворения плановой отдачи. Когда

дефицит стока больше его избытка за период регулирования, обеспечить бездефицитную отдачу нельзя. По второму способу учета потерь несколько меняется форма таблиц.

Расчетом находят предварительное и конечное наполнение для каждого интервала времени.

Конечное (окончательное) наполнение равно начальному (предварительному) наполнению плюс потери воды. Начальное (предварительное) наполнение равно конечному (окончательному) наполнению предыдущего интервала времени плюс разность стока и отдачи за интервал. Потери определяют аналогично, как и для первого способа учета потерь.

При обратной задаче таблично-цифровым способом находят фактические отдачи при заданных условиях регулирования, то есть при притоке в водохранилище, плановой отдаче, нормах потерь и начальном наполнении, а также известной полезной емкости.

Расчет ведут в табличной форме (табл. 13).

Форма таблицы совпадает с таблицами, применяемыми в расчетах при прямой задаче.

ТАБЛИЦА 13

Δt	V_n	W	U	V_{ϕ}	V_k	V_{cp}	Π	V'_{ϕ}	V'_k	S	D	$U_{\phi k}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

В таблице Δt — расчетный интервал времени (сутки, декада, месяц); W — сток за интервал, $м^3$; U — плановая отдача, $м^3$; V_{ϕ} — фиктивное наполнение, не ограниченное емкостью водохранилища без учета потерь воды, равное $V_{\phi} = V_n + W - U$, $м^3$; V_k — конечное наполнение, ограниченное емкостями полного и мертвого объемов, $м^3$; V_{cp} — среднее за интервал времени наполнение, равное полусумме начального и конечного наполнений (графы 2 и 6), $м^3$; Π — потери воды, $м^3$; V'_{ϕ} — фиктивное наполнение с учетом потерь, равное $V'_{\phi} = V_n + W - U - \Pi$, $м^3$; V'_k — конечное наполнение с учетом потерь, $м^3$.

Если $V'_{\phi} > V_{нп}$, то $V'_k = V_{нп}$ и производится сброс воды в нижний бьеф. В графу 11 записывается величина $S = V'_{\phi} - V_{нп}$, $м^3$.

Если $V_{нп} \geq V'_{\phi} \geq V_{м.о}$, то $V'_k = V'_{\phi}$ и сбросы и дефициты отсутствуют.

При $V'_{\phi} < V_{м.о}$ и $V'_{\phi} < 0$, $V'_k = V_{м.о}$, но возникают дефициты отдачи, численно равные $D = V_{м.о} - V'_{\phi}$. При отрицательных значениях фиктивного наполнения дефицит отдачи равен сумме объемов $V_{м.о}$ и V'_{ϕ} . Фактическая отдача $U_{\phi k}$ при наличии дефицитов равняется плановой отдаче (графа 4) минус дефицит отдачи $U_{\phi k} = U - D$, $м^3$.

Конечное наполнение (графа 8) является начальным наполнением для последующего интервала времени. Проведенным цепным таблично-цифровым расчетом в хронологической последовательности для каж-

дого интервала времени находят искомые величины фактических отдач, сбросов и конечных наполнений за период регулирования стока.

Для многолетнего ряда расчет проводят по всем годам периода регулирования и вариантам плановой отдачи.

§ 2. Графические балансовые расчеты

При графических балансовых расчетах регулирования стока применяют следующие суммарные кривые стока и отдачи: полные, сокращенные и разностные.

Исходными данными для построения полных интегральных (суммарных) кривых служат гидрографы стока и потребной отдачи или ведомости их средних расходов за расчетные интервалы времени.

Суммарный объем притока, или ординату полной суммарной кривой стока, находят как $W = \int_0^t Q dt$, или при конечных интервалах времени

$$W = \sum_0^t Q \Delta t.$$

Суммарный объем отдачи за период от начала расчета до t , или ордината полной суммарной кривой отдачи, равна:

$$U = \sum_0^t q \Delta t, \quad (53)$$

где Q и q — расходы притока и отдачи, $м^3/сек$;

Δt — расчетный интервал времени (декада, сутки, месяц).

Суммарные кривые стока и отдачи, как и гидрографы, отражают в графической форме распределение расходов воды, притекающей и забираемой в створе реки или водохранилища.

Полную интегральную (суммарную) кривую называют интегральной кривой в прямоугольных координатах (рис. 72). На рисунке дан переход от гидрографа стока к суммарной кривой.

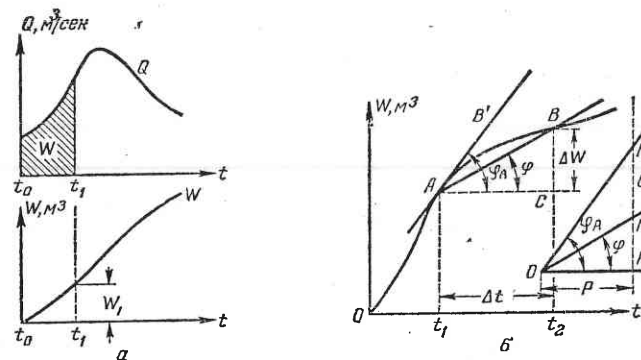


Рис. 72. Гидрограф стока и полная суммарная кривая (а); полная суммарная кривая и лучевой масштаб (б).

Сокращенные интегральные (суммарные) кривые стока и отдачи называют кривыми в косоугольных координатах.

Рисунок 73 иллюстрирует переход от полных интегральных кривых стока и отдачи к сокращенным.

Исходными данными для построения разностной интегральной кривой (рис. 74) служит или гидрограф разности расходов стока и отдачи, или ведомость суммарных разностей объемов стока и отдачи по интервалам времени от начала расчета до конца периода регулирования. На рисунке приведен расчет по двум вариантам правил регулирования.

Применение интегральных кривых к расчетам регулирования стока основано на четырех свойствах.

Ординаты суммарных кривых стока и отдачи в прямоугольных координатах дают суммарные объемы стока и отдачи от начала расчета до рассматриваемого момента времени. Ординаты непрерывно возрастают по мере увеличения периода регулирования. Разность ординат двух точек суммарной кривой равна приращению объема за отрезок времени, ограниченный ординатами.

Ордината сокращенной интегральной кривой стока в косоугольных координатах равна разности объемов:

$$W_c = \int_0^t (Q - \bar{Q}) dt = W - \bar{W} \text{ м}^3, \quad (54)$$

где $\bar{W}$ — ордината суммарной кривой среднего равномерного (постоянного) за период регулирования расхода.

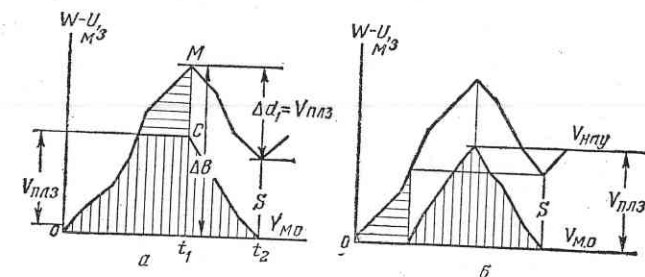


Рис. 74. Разностная кривая:

а — первый вариант правил регулирования; б — второй вариант (вертикальная штриховка — наполнение; горизонтальная — сброс).

Ордината разностной суммарной кривой равна разности объемов стока и отдачи от начала расчета до рассматриваемого момента времени:

$$W_r = \sum_0^t Q \Delta t - \sum_0^t q \Delta t = W - U, \text{ м}^3, \quad (55)$$

где q — расход отдачи, $\text{м}^3/\text{сек}$;

U — объем отдачи за период от начала расчета, м^3 .

Тангенсы углов между прямой, соединяющей две точки суммарной кривой, с осью абсцисс равны для полной суммарной кривой (прямоугольные координаты) среднему расходу за отрезок времени Δt :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = Q_{\text{ср}} \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (56)$$

Для сокращенной суммарной кривой (косоугольные координаты) тангенс угла наклона секущей равен разности средних расходов:

$$\operatorname{tg} \varphi_i = \frac{\Delta W - \Delta \bar{W}}{\Delta t} = Q_{\text{ср}} - \bar{Q} \text{ м}^3/\text{сек}, \quad (57)$$

где $Q_{\text{ср}}$ — средний расход за отрезок времени между двумя точками кривой;

$\bar{Q}$ — средний расход за период расчета.

Тангенс угла между касательной к суммарной кривой в точке A и осью абсцисс дает расход в данной точке кривой, построенной в прямоугольных координатах:

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{dW}{dt} = Q_A \text{ м}^3/\text{сек}. \quad (58)$$

Для сокращенной суммарной кривой тангенс угла между касательной к суммарной кривой в точке A и осью абсцисс равен разности расходов. Аналогично получаются разности расходов стока и отдачи при разностной суммарной кривой.

Для графического построения суммарных кривых и снятия с последних расходов стока и отдачи в точке и средних по интервалам времени с учетом масштабов времени и расходов используют лучевой масштаб (рис. 75).

Основание лучевого масштаба находят по формуле:

$$P = \frac{m_W \cdot u}{m_t \cdot m_{Q,q}}, \quad (59)$$

где m_W , m_t , $m_{Q,q}$ — масштабы объемов, времени и расходов, принятые при построении суммарных кривых.

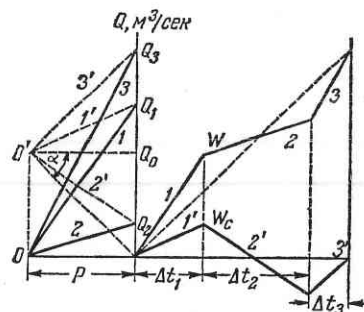


Рис. 75. Суммарные кривые (полная — W , сокращенная — W_c) и лучевой масштаб:

1, 2, 3 — полной суммарной кривой; 1', 2', 3' — сокращенной.

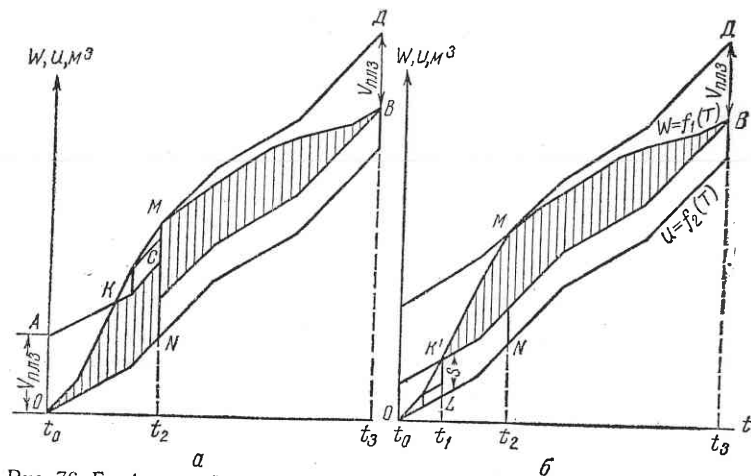


Рис. 76. Графический расчет в прямоугольных координатах по суммарным кривым стока $W=f_1(T)$ и отдачи $U=f_2(T)$:
а — первый вариант; б — второй.

Построение лучевого масштаба применительно к сокращенной суммарной кривой показано на рисунке 75 (линия 1'2'3').

Применение суммарных кривых стока и отдачи в прямоугольных координатах для графического расчета показано на рисунке 76 для двух предельных случаев правил регулирования без учета потерь.

При графическом расчете по суммарным кривым стока и отдачи с учетом потерь в начале составляют вспомогательный график зависимости объема потерь от емкости водохранилища при различных грациях норм суммарных потерь за расчетный интервал времени (рис. 77). Расчет ведут против хода времени. Вначале определяют полезную емкость водохранилища и наполнения по интервалам времени без учета потерь воды. Для каждого расчетного интервала времени графически находят среднее наполнение. Определив среднее наполнение для завершающего расчет интервала, снимают с графика объем потерь воды

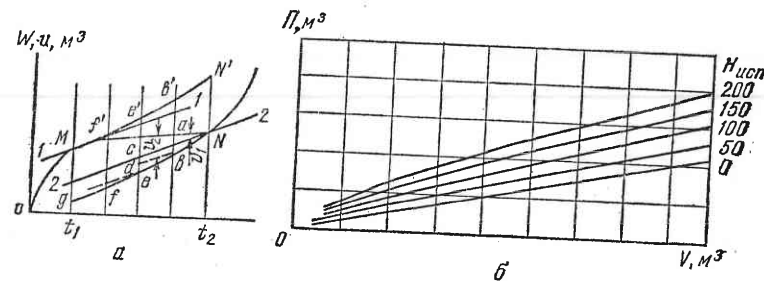


Рис. 77. Графический расчет с учетом потерь:
а — суммарная кривая стока — OMN ; б — график для подсчета потерь воды $P=f(v)$.

для рассматриваемого интервала времени. Приплюсовывают полученный графически объем потерь к начальному наполнению снизу (ордината ed на рисунке 77).

Для второго (против хода времени) интервала среднее наполнение включает и потери первого интервала. По среднему наполнению с использованием графика находят потери воды для второго месяца. Приплюсовывают их к начальному наполнению и проводят линию через точку e .

Начальное наполнение с учетом потерь предыдущего интервала является конечным для последующего. Расчет заканчивается датой, когда измененная на потери суммарная кривая отдачи, взятая как нижняя касательная, пересекает суммарную кривую стока.

Полезную емкость водохранилища с учетом потерь воды находят как максимальное расстояние между верхней и последующей нижней касательной, проведенными параллельно суммарной кривой отдачи, измененной на потери. Так как потери воды по времени изменяются, то суммарная кривая отдачи имеет изломы в каждом интервале времени.

Графический расчет регулирования стока с применением сокращенных суммарных кривых стока и отдачи при двухтактной работе водо-

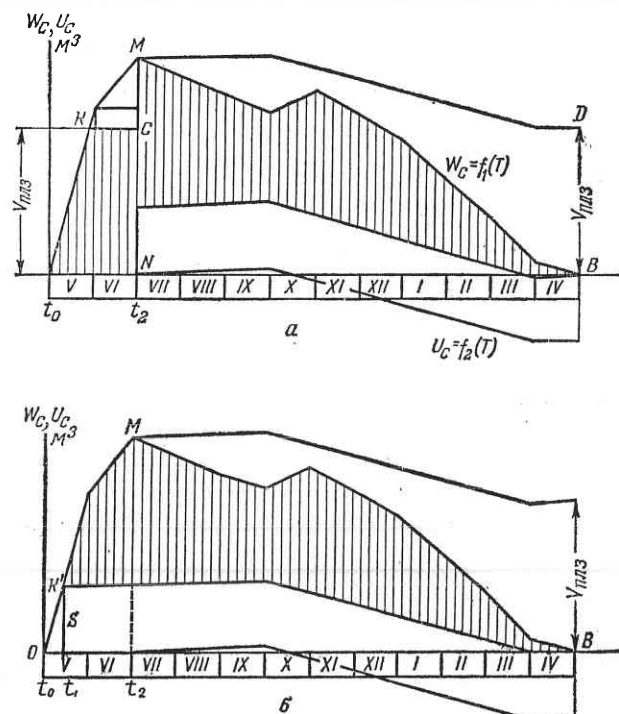


Рис. 78. Графический расчет водохранилища (сокращенная суммарная кривая стока W_c , отдачи U_c):
а — первый вариант правил регулирования; б — второй вариант.

хранилища с зависимым циклом для двух вариантов правил регулирования иллюстрируется рисунком 78.

Приближенный расчет водохранилища по типу обратной задачи приведен на рисунке 79 а, б. В этом случае требуется по заданному стоку и полезной емкости водохранилища определить наиболее целесообразное распределение отдачи внутри года, построить ее суммарную кривую и определить режим наполнений и сбросов.

Для расчета строят две полные суммарные кривые стока: основную и смещенную вниз на расстояние, по масштабу равное полезной емкости.

Основную суммарную кривую стока принимают за линию пустого водохранилища.

Суммарную кривую стока, смещенную вниз параллельно основной на величину полезной емкости, принимают за линию наполненного водохранилища.

При полном использовании стока конечное наполнение равно начальному. Этому условию отвечает равенство объемов стока и отдачи за расчетный период. При полном использовании стока и постоянной отдаче замыкающая прямая, соединяющая две крайние точки основной суммарной кривой стока, и будет суммарной кривой отдачи, если последняя только касается и не пересекает вторую смещенную вниз суммарную кривую стока. Если полезная емкость водохранилища окажется недостаточной, чтобы обеспечить равномерную отдачу, переходят на неравномерную отдачу. Линия отдачи располагается внутри полосы, ограниченной суммарными кривыми, и может иметь несколько точек касания с последними.

Если отдача меняется дважды за период (во время избыточного стока одна, а во время дефицита — другая), то суммарная кривая отдачи состоит из двух отрезков прямых, опирающихся концами на ограничивающие суммарные кривые стока (рис. 79, а).

Общим приемом расчета для задач подобного вида является получение минимальной отдачи во время избыточного стока, что достигается проведением касательной от основной суммарной кривой к суммарной кривой, смещенной вниз на величину полезной емкости.

Во время дефицита отдача максимально повышается и касательная проводится от смещенной вниз суммарной кривой к основной. Линия проектируемой отдачи находится внутри ограничивающих суммарных кривых.

График наполнений представлен отрезками ординат, заключенных между основной кривой пустого водохранилища и линией проектируемой отдачи. При неполном использовании стока проводят сбросы (рис. 79, б).

Графические балансовые расчеты с применением суммарных кривых проводят главным образом без учета потерь воды, так как расчет с учетом потерь воды сложен. Графические балансовые расчеты наиболее часто применяют при решении обратной задачи, ими просто находят различные варианты распределения отдачи внутри расчетного периода при заданных величинах стока и полезной емкости.

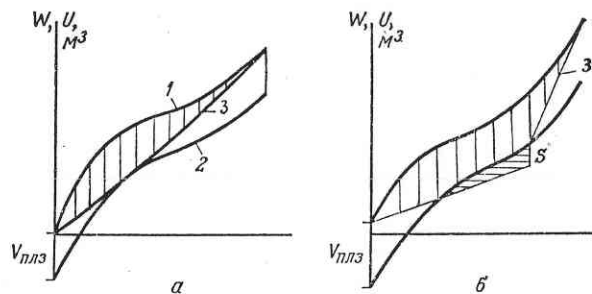


Рис. 79. Графический расчет водохранилища (обратная задача):

a — при полном использовании стока; *b* — при неполном с холостыми сбросами; 1 — линия пустого водохранилища; 2 — линия наполненного водохранилища; 3 — суммарная кривая отдачи.

В практике проектирования графические расчеты вытесняются таблично-цифровыми и применяются преимущественно для выполнения вспомогательных операций. Наглядность графических расчетов делает их удобными для освоения методики и понимания процесса регулирования стока, особенно в процессе обучения.

§ 3. Учет коррелятивных связей между стоками смежных отрезков времени

Кривые обеспеченности стока, используемые в расчетах регулирования без учета коррелятивных связей между водностью смежных отрезков времени (так называемые безусловные кривые), все чаще заменяют кривыми, учитывающими эту связь. Последние называют условными кривыми. В зависимости от длительности расчетных отрезков времени можно использовать различные кривые обеспеченности.

Наличие коррелятивных связей между стоками смежных отрезков времени отмечено давно. Впервые на это обратил внимание П. А. Ефимович; в последующие годы разработкой методики учета коррелятивных связей занимались М. В. Потапов, С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель, Н. А. Картвелишвили.

При отсутствии связи между стоками смежных лет коэффициент изменчивости стока за n лет находят по зависимости:

$$C_{v,n} = \frac{C_v}{\sqrt{n}}. \quad (60)$$

При наличии коррелятивной связи между стоком смежных лет коэффициент изменчивости для n лет рассчитывают по формуле:

$$C_{v,n} = \frac{C_v}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{n} \frac{r}{1-r} \left(n - \frac{1-r^n}{1-r} \right)}, \quad (61)$$

где C_v — коэффициент изменчивости ряда годовых величин стока;
 r — коэффициент корреляции между стоком смежных лет.

Все большее распространение вероятностных методов при регулировании стока и внедрении электронно-вычислительных машин для расчетов делает возможным учет коррелятивных связей между водностью смежных периодов времени, так как трудоемкость вычислений устраняется.

Ряд проведенных исследований показывают большую роль коррелятивных связей годовых и внутригодовых стоков смежных отрезков времени в расчетах регулирования. Пренебрежение их учетом вызывает занижение объема нормальной годовой отдачи.

Г. Г. Сванидзе положил уравнение регрессии за основу при моделировании гидрологических рядов стока. Ввиду общности приемов расчета по учету коррелятивных связей между стоком смежных отрезков изложение последнего дается применительно к моделированию гидрологических рядов.

За период наблюдений ряды характеризуются своей нормой, стандартом и коэффициентом асимметрии. Связь между стоками смежных отрезков времени выражается функцией перехода, значения которой и есть условные вероятности распределения k_{i+1} при заданных значениях k_i .

$$k_{i+1}(k_i) - \bar{k}_{i+1} = r \frac{\sigma_{ki+1}}{\sigma_{ki}} (k_i - \bar{k}_i), \quad (62)$$

где σ_{ki+1} и σ_{ki} — безусловные стандарты средних расходов рассматриваемого и предыдущего отрезков времени;

$k_{i+1}, k_i, \bar{k}_{i+1}, \bar{k}_i$ — модульные коэффициенты и норма стока текущего и предыдущего отрезков времени;

r — коэффициент корреляции между стоком смежных отрезков времени.

Так как календарные ряды для годовых отрезков времени численно равны и состоят из одной совокупности, смещенной на один год, то $\sigma_{ki+1} = \sigma_{ki}$ и $\bar{k}_{i+1} = \bar{k}_i = 1$; тогда зависимость примет вид:

$$k_{i+1}(k_i) = 1 + r(k_i - 1). \quad (63)$$

Принимается гипотеза, что отношение $\frac{k_{i+1}(k_i)}{1 + r(k_i - 1)}$ распределяется по кривой Пирсона III типа с условными коэффициентами вариации и асимметрии:

$$C_{v_{yc}}^{i+1} = \frac{C_v \sqrt{1-r^2}}{1+r(k_i-1)}; \quad C_{s_{yc}}^{i+1} = \frac{2C_v \sqrt{1-r^2}}{1+r(k_i-1)}.$$

Тогда уравнения (62) записывают в виде:

$$k_{i+1}(k_i) = 1 + r(k_i - 1) + \Phi_{i+1} C_v \sqrt{1-r^2}. \quad (64)$$

Когда связи нет ($r=0$, $k_{i+1}=1+\Phi_{i+1}C_v$), значения Φ_{i+1} берут по таблицам Фостера — Рыбкина. Когда связь имеется, то по найденным значениям $C_{s_{yc}}^{i+1}$ по таблице Фостера — Рыбкина определяют Φ_{i+1} и находят искомое значение k_{i+1} . Характер связей строго линейный.

Отклонение случайных величин от их нормы делится на 2 группы: независимую (от водности предыдущего отрезка и пропорциональную $\Phi_{i+1} C_p \sqrt{1-r^2}$) и зависящую (от водности предыдущего отрезка $r(k_i - 1)$, пропорциональную нормированному отклонению и коэффициенту корреляции). Этот способ трудоемок, для решения рекомендуется применять электронно-вычислительные машины. Для данного способа Г. Г. Сванидзе приводит программу моделирования. Для месячных интервалов времени уравнение записывают в общем виде:

$$Q_{i+1}(Q_i) = \bar{Q}_{i+1} + r \frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i} (Q_i - \bar{Q}_i) + \Phi_{i+1} \sigma_{i+1} \sqrt{1-r^2}, \quad (65)$$

где σ_{i+1} и σ_i — стандарты средних расходов предыдущего и рассматриваемого месяцев;

Q_i и Q_{i+1} — норма стока рассматриваемого и предыдущего месяцев.

Для месячных интервалов принять условие равенства нормы стока или стандартов нельзя.

При расчете имеет значение выбор длительности расчетных отрезков времени. При увеличении длительности коррелятивная связь может изменяться.

Глава VI. СЕЗОННО-ГОДИЧНОЕ И МНОГОЛЕТНЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТОКА

§ 1. Методика расчета

Основные виды регулирования стока — сезонно-годовое и многолетнее. При сезонно-годовом регулировании перераспределение естественного стока или стока, измененного вышерасположенными по реке сооружениями, происходит в течение годового цикла, то есть регулируются внутригодовые колебания стока в соответствии с запросами водопотребителей или водопользователей. Сезонно-годовое регулирование называется глубоким, когда сток перераспределяется за весь годовой период времени, и неглубоким (сезонным), когда регулируются внутри-сезонные колебания стока за отдельные сезоны или более мелкие расчетные интервалы времени. Повышение расходов отдачи до заданных величин при сезонно-годовом регулировании происходит за счет избыточного стока данного года. Водохранилища сезонно-годовое регулирование стока заполняются в периоды повышенного стока или пониженного водопотребления и сбрасываются ежегодно до мертвого объема. Цикл регулирования стока завершается в течение года или его части.

При работах сезонно-годовое регулирование стока приток в водохранилище характеризуется отдельными годовыми расчетными гидрографами или сконструированным гидрографом стока заданной обеспеченности.

Сезонно-годовое регулирование стока является наиболее распространенным видом регулирования и широко применяется в целях водопотребления и водопользования. Наиболее крупные водохранилища

в СССР для энергетических целей на равнинных реках осуществляют сезонно-годовое регулирование.

При сезонно-годовом регулировании стока начальное и конечное наполнения принимают одинаковыми, равными объему при НПУ, или мертвому объему. Емкость водохранилищ сезонно-годовое регулирование ограничена объемом недостающего или избыточного стока в лимитирующие периоды (сезоны) года. При расчете сезонно-годовое регулирование можно не соблюдать хронологическую последовательность лет. При изолированно работающем водохранилище, обслуживающем одного или нескольких потребителей, расчет упрощается. Все величины, фигурирующие при регулировании, подразделяются на три категории. Условия регулирования отражают расчетный сток, потребность в воде, нормы потерь воды из водохранилища и начальное наполнение.

Вариантами при регулировании служат площадь орошения, размеры водохранилища и правила регулирования в течение года. К результатам регулирования относятся получаемые водоотдачи, наполнения водохранилища и холостого сброса.

Необходимость сезонно-годовое регулирование стока выясняется таблично-цифровыми или графическими балансовыми расчетами по принятым отрезкам времени за год.

Выбор расчетных отрезков времени зависит от распределения стока и характера водопотребления или водопользования. При резком колебании стока и водопотреблении за год отрезки времени принимают от пятидневки до месяца. При более или менее равномерном режиме стока их укрупняют до сезона.

Период накопления (аккумуляции воды) приурочивают к сезонам повышенного стока или пониженного водопотребления, а период сбросов (опорожнения) — к лимитирующему периоду, сезону.

Укрупнение расчетных отрезков времени снижает объем вычислительных работ, не позволяет детально учесть внутрисезонную изменчивость стока и потребления, что может привести к преуменьшению емкости водохранилища и преувеличению величины нормальной годовой гарантированной отдачи. Обычно расчет сезонно-годовое регулирование проводят по декадам или месяцам.

При сезонно-годовом регулировании стока применяют балансовые методы расчета по типовым внутригодовым распределениям или календарным рядам непосредственных гидрометрических наблюдений с их статистической обработкой или расчеты по отдельным годам заданной обеспеченности.

При полном сезонно-годовом регулировании сток расчетного года заданной обеспеченности целиком идет на потребление и потери воды из водохранилища, причем холостые сбросы не проводятся совсем. В отдельные многоводные годы с водностью, превышающей плановую отдачу и потери, проводят холостые сбросы воды в нижний бьеф.

При проектировании водохранилища сезонно-годовое регулирование стока на изученных в гидрологическом отношении реках рассчи-

тывают, как правило, по календарным рядам месячных или декадных объемов стока, а в период эксплуатации целесообразно применять вероятностные методы.

Продолжительность данных наблюдений, необходимых для балансовых расчетов, зависит от класса капитальности сооружений. Для мелких объектов проектирования при отсутствии данных гидрометрических наблюдений применяют косвенные приемы оценки изменчивости стока по годам и внутри года.

Большинство существующих рекомендаций по расчету сезонно-годового регулирования разработано применительно к жесткой постоянной отдаче.

Нормами проектирования (СН-371-67) при сезонно-годовом регулировании стока для сооружений I и II классов капитальности рекомендуется применять календарные ряды наблюдений, включающие периоды не менее 10 лет с внутригодовым распределением стока по месяцам или декадам. Для сооружений III и IV классов расчет рекомендуется проводить по году заданной обеспеченности, скомбинированному с учетом требований проектирования методом компоновки. Допускаются другие методы расчета при их достаточном обосновании и сравнении с расчетом по данным гидрометрических наблюдений.

Модель гидрографа стока по методу компоновки проектируется по периодам и сезонам года и более мелким интервалам времени. При компоновке соблюдается условие равнообеспеченности расчетного годового стока, лимитирующего периода, сезона, месяца. Лимитирующие периоды, сезоны и месяцы назначают из условий проектирования.

Границы сезонов (половодья, межени, весны, лета — осени, зимы) принимают в соответствии с природным распределением стока, но они не всегда достаточно определены и устойчивы. Объемы стока за период уравнивают с суммой объемов составляющих его сезонов. Полученное внутригодовое распределение стока для характерных лет используется для составления модели гидрографа, которая применяется в расчетах регулирования. Основные положения метода компоновки, по которому формируется модель расчетного гидрографа годового стока, логически оправданы. Разработка метода компоновки советскими учеными позволила приблизить гидрологические расчеты к требованиям водохозяйственного проектирования. Метод компоновки выгодно отличается от ранее применявшихся методов фиктивного года, реального года, вычисляемых по суммарному годовому стоку, или года с равнообеспеченными и месячными стоками, годовым и меженным и т. д. Статистическую обработку данных гидрометрических наблюдений проводят в границах межени и половодья. Продолжительность периода сработки и наполнения водохранилищ по годам изменяется, статистическая обработка объемов стока в переменных границах вносит неопределенность при вычислении обеспеченности стока и связанных с ним отдач. Жесткое закрепление границ сезонов устраняет эту неопределенность, но при этом продолжительность половодья преувеличивается, так как принятые его границы включают фактические половодья за

все годы как с наиболее ранним сроком его наступления, так и с наиболее поздним сроком окончания. Меженный сток преуменьшается.

Приравнивание сезонов межени и половодья к периодам сработки и заполнения водохранилища допустимо лишь для рек с устойчивым внутригодовым распределением стока.

Расчет сезонно-годового регулирования стока по календарным рядам стока, составленным на основании гидрометрических наблюдений достаточной длительности, является наиболее точным и не требует учета связей между стоком различных отрезков времени. Его можно выполнять таблично-цифровыми приемами для различных вариантов отдач. Однако при расчете работы водохранилища за короткие периоды времени в период эксплуатации неизвестно, от какой даты ряда надо вести расчет, и результат получается случайным.

В случае целесообразности исследуются одновременно с характеристикой внутригодового стока также и результаты расчета регулирования стока. По СН-371-67 рекомендуется выбирать расчетный год из числа наблюдаемых лет по величинам дополнения до 100% обеспеченности дефицитов стока для 2—3 значений отдачи (для случая регулирования на повышение низкого стока).

Для каждого варианта нормальных годовых отдач, назначаемых, исходя из определенного проектного уровня, находят по годам расчетного периода значения сезонно-годовой емкости с учетом ее ежегодной сработки, или дефицита стока. Составляют эмпирические кривые обеспеченности $\beta = \varphi(p)$ или $D = f(p)$. Расчетный год из числа фактических выбирают по зависимости

$$p(\alpha) = 100 - p(\beta) = 100 - p(D), \quad (66)$$

где $p(\alpha)$, $p(D)$ и $p(\beta)$ — расчетные обеспеченности нормальной годовой отдачи, дефицита стока и емкости водохранилища в %.

Способ применяют при однократной работе водохранилища, емкость которого вычисляется по единственному дефициту стока.

Для детальных и предварительных расчетов П. А. Ляпичев рекомендует разработанный им метод «кривых обеспеченности возможных отдач». При наличии данных наблюдений и заданной емкости водохранилища сезонно-годового регулирования стока определяют изменяющиеся из года в год отдачи, строят кривую обеспеченности отдач $q = f(p)$, по которой и устанавливают гарантированную отдачу расчетной обеспеченности. Задаваясь различными значениями емкости, можно определить и соответствующие им расчетные обеспеченности годовых отдач. При сезонно-годовом регулировании стока требуется ежегодная сработка водохранилища.

Для сокращения вычислительной работы при большой длительности календарного ряда наблюдений расчет сезонно-годового регулирования стока ведут часто не по всем годам, а по характерному периоду ряда, включающему неблагоприятные маловодные годы. Характерный период ряда должен включать многоводные средние и маловодные по стоку годы. Статистические параметры календарного ряда наблюде-

ний и характерного периода должны совпадать, быть равными. Расчет по характерному периоду ряда при правильном его выборе дает сопоставимые результаты с расчетом по всему календарному ряду гидрометрических наблюдений. Выбор характерного периода проводят с учетом цикличности по разностной суммарной кривой стока.

При коротком ряде наблюдений можно использовать способ сопоставления разностных суммарных кривых по нескольким пунктам, расположенным на разных реках-аналогах. Расчет сезонно-годового регулирования проводят и по расчетному реальному году.

Из числа фактических лет наблюдений после их статистической обработки и расположения в убывающем ряду рассматривают маловодные годы. Год, где обеспеченность стока за лимитирующий сезон или месяц равна заданной обеспеченности отдачи, принимают за расчетный. Он близок к равнообеспеченному по основным лимитирующим отрезкам времени.

Расчетный период наблюдений должен иметь не менее 20 лет.

Достаточно обоснованный выбор расчетного года из числа наблюдаемых лет затруднителен даже при наличии длинного ряда наблюдений, а при коротком ряде невозможен.

Кроме перечисленных методов расчета сезонно-годового регулирования стока при наличии наблюдений, предложены и другие. При наличии данных за ограниченный ряд лет, недостаточный для определения статистических параметров стока и внутригодового его распределения, применяют метод гидрологической аналогии. При отсутствии гидрометрических данных используют карты изолиний параметров стока и эмпирические формулы.

Внутригодовое распределение стока находят по районным схемам с учетом азональных физико-географических факторов.

Другие условия регулирования, необходимые для расчета сезонно-годового регулирования стока (кривая объемов, нормы потерь, полезная отдача), определяют изысканиями, съемками и исследованиями на объекте проектирования и народнохозяйственным планам на расчетный проектный уровень.

Расчет при отсутствии данных является весьма приближенным.

Для сезонно-годового и многолетнего регулирования стока применим разработанный А. Д. Саваренским метод вероятных вариантов, сочетающий балансовые и вероятностные расчеты. Основные положения метода рассмотрены в § 5.

§ 2. Сезонная емкость водохранилища многолетнего регулирования

В ряде методов расчета многолетнего регулирования полезную емкость делят на две составляющие — сезонно-годовую и многолетнюю, которые определяют отдельно. Сезонно-годовая составляющая предназначена для ликвидации сезонного дефицита, вызванного колебаниями стока внутри года.

Приближенный расчет сезонно-годовой составляющей проводят обычно при следующих допущениях.

Емкость находят в относительных единицах, как долю от среднего многолетнего стока:

$$\beta_{\text{сез}} = \frac{V_{\text{сез}}}{W_0},$$

где W_0 — среднее многолетний объем стока;

$V_{\text{сез}}$ — сезонно-годовая составляющая емкости.

Отдача дана в виде коэффициента зарегулирования α и включает в себя потери воды.

Емкость определяют по году, в котором сток равен отдаче.

Сток берут в виде модульных коэффициентов K .

Отдачу внутри года принимают равномерной; для различных лет она изменяется в пределах от $K_p = \alpha$ до $\alpha = 1$.

Сток внутри года вычисляют в четких границах межени (при делении года на два сезона).

Сезонно-годовую составляющую емкости чаще всего вычисляют по приближенным зависимостям, предложенным С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем:

$$\text{при } \alpha = K_{p.g} \quad \beta_{\text{сез}} = K_{p.g} t_m - \bar{m} K_{p.m}; \quad (67)$$

$$\text{при } \alpha = 1 \quad \beta_{\text{сез}} = t_m - \bar{m}; \quad (68)$$

$$\text{при } K_{p.g} < \alpha < 1 \quad \beta_{\text{сез}} = \alpha t_m - \bar{m} - m \frac{1 - K_{p.m}}{1 - K_{p.g}} (1 - \alpha), \quad (69)$$

где t_m — длительность межени в долях года;

$\bar{m}$ — доля средней межени в годовом стоке;

$K_{p.g}$ — годовой сток расчетной обеспеченности;

$K_{p.m}$ — расчетный сток межени.

Сезонно-годовую составляющую полезной емкости водохранилища многолетнего регулирования стока при $\alpha = 1$ и $\alpha = K_p$ можно находить графически по совмещенным суммарным кривым стока и отдачи.

При равномерной отдаче в течение года П. А. Ляпичев предлагает находить сезонную емкость в относительных величинах по более детальной зависимости:

$$\beta_{\text{сез}} = \alpha t_m - \bar{m} K_{p.m} - \bar{m} \Delta K, \quad (70)$$

где $\bar{m} \Delta K$ — поправка за счет начальных и конечных частей межени периода.

Емкость водохранилища многолетнего регулирования стока при наличии данных наблюдений можно вычислить без разделения ее на составные части.

При сосредоточенной отдаче внутри года, например при ирригационном водопотреблении, расчет по перечисленным выше формулам преуменьшает величину сезонно-годовой составляющей полезной емкости. Для временных водотоков, когда весь сток проходит в период половодья, приближенно сезонно-годовую составляющую емкости находят по зависимости:

$$V_{\text{сез}} = \alpha W_0. \quad (71)$$

М. В. Потапов сезонно-годовую составляющую полезной емкости определяет в виде:

$$\beta_{\text{сез}} = \alpha \beta_0, \quad (72)$$

где β_0 — объем, необходимый для полного использования средне-многолетнего стока со средним распределением по сезонам.

Если гарантированная отдача заданной расчетной обеспеченности внутри года неравномерна, то ее обычно приводят к равномерной. В расчетную зависимость для определения многолетней составляющей емкости вводится коэффициент, равный отношению отдачи в межень к средней годовой. Сезонно-годовую составляющую полезной емкости при неравномерной отдаче внутри года, но постоянной в многолетнем разрезе вычисляют по зависимости:

$$\beta_{\text{сез}} = \alpha (at_m - \bar{m}_m), \quad \text{где } a = \frac{\alpha_m}{\alpha}. \quad (73)$$

При неравномерной отдаче внутри года фактические отдачи заменяют средней фиктивной отдачей, что позволяет использовать ранее приведенные зависимости для нахождения сезонно-годовой составляющей емкости. В ряде методов предусматривается более точное определение сезонно-годовой составляющей (В. Г. Айвазян, В. Г. Андреянов, М. Н. Вагапов), основанное на композиции кривых обеспеченностей.

§ 3. Многолетнее регулирование стока

Многолетнее регулирование предназначено для перераспределения стока как внутри года, так и за ряд лет. Цикл регулирования продолжается в течение многолетнего периода. Полная сработка водохранилища до мертвого объема происходит в маловодные годы.

При многолетнем регулировании требуется длительный календарный ряд наблюдений для того, чтобы выявить все возможные группировки маловодных лет и различные варианты внутригодового распределения стока.

Необходимость в многолетнем регулировании стока выясняется сопоставлением расчетного годового стока с заданной отдачей за год. Если сток расчетного года не обеспечивает заданную отдачу, а снижение ее невозможно, требуется многолетнее регулирование.

Поддержание отдачи, превышающей приток расчетного года, проводят за счет накопления избытков стока в годы повышенной водности и их сработки в маловодные годы.

При расчетах многолетнего регулирования в ряде методов используются относительные величины. Сток выражается модульным коэффициентом, отдача — коэффициентом зарегулирования α , емкость — коэффициентом емкости β . При многолетнем регулировании, как правило, балансовые расчеты сочетаются с вероятностными.

При орошении в засушливой зоне и водоснабжении для обособленных объектов, не связанных друг с другом, применяют простое

регулирование на постоянную отдачу, не изменяющуюся в зависимости от природных факторов по годам периода регулирования.

Методика расчета многолетнего регулирования стока на постоянную отдачу достаточно проста. Постоянная отдача обеспечивается потребителям с заданной гарантией за многолетний период. В многоводные годы производятся холостые сбросы воды в нижний бьеф, без использования. При простом регулировании соблюдаются проектные условия и поддерживается режим работы водохранилища.

Балансовые расчеты аналогичны расчетам сезонного регулирования стока (таблично-цифровые и графические приемы). Балансовые расчеты проводят по месячным или сезонным отрезкам времени за весь период наблюдений от начала до конца в хронологической последовательности.

К основным методам, основанным на использовании теории вероятностей, относятся: метод отбора характерных групп наполнений С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля (1935 г.) и метод вероятных вариантов (цепных вероятностных расчетов) А. Д. Саваренского (1938 г.).

§ 4. Метод вероятностных расчетов С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля

По этому методу полезная емкость водохранилища подразделяется на две составляющие — многолетнюю и сезонную, вычисляемые отдельно.

Между обеспеченностью нормальной годовой отдачи P характеристиками стока, многолетней составляющей емкости, отдачей и коэффициентом корреляции устанавливается связь

$$P = (\alpha, \beta_{\text{мн}}, C_v, C_s, r), \quad (74)$$

где P — процент обеспеченности нормальной годовой отдачи;
 α — коэффициент зарегулирования, включающий полезную отдачу и потери воды из водохранилища (принимается в долях от нормы стока);
 $\beta_{\text{мн}}$ — коэффициент многолетней составляющей полезной емкости, выраженный в долях нормы стока;
 C_v и C_s — коэффициенты вариации и асимметрии годового стока;
 r — коэффициент корреляции между стоками смежных лет;
 r в рассмотренном случае принимается равным нулю.

Отдачу α считают постоянной для всего периода регулирования. Годовой сток различных лет характеризуется модульными коэффициентами K . Суммарное число модульных коэффициентов равно числу лет календарного ряда. Модульный коэффициент годового стока не отражает внутригодового распределения стока, для каждого года сток считается равномерным. Для устранения внутригодовой неравномерности стока дополнительно назначается сезонно-годовая составляющая полезной емкости.

Все значения в правой части соотношения (74) известны. Требуется определить обеспеченность годовой отдачи. Расчет можно выполнять как по данным непосредственно календарного ряда наблюдений, так

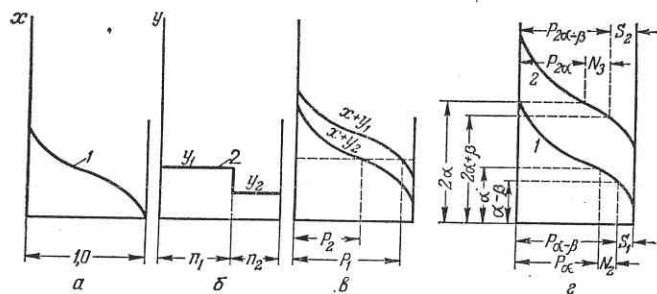


Рис. 80. Схема расчета по С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю:
а, б, в — сложение кривых обеспеченности; г — построение кривых обеспеченности двухлетних стоков

и по обобщенным параметрам стока с использованием кривой обеспеченности.

Путем сложения кривых обеспеченности (рис. 80, а — в) проводят рассортировку и погодовой отбор общего числа лет по группам безусловно обеспеченных и необеспеченных лет. Методика отбора приведена на рисунке 80, г и в таблице 14.

Кривая обеспеченности стока для первого года отбора расчленяется двумя линиями, параллельными оси абсцисс, при значении α и $\alpha - \beta_{\text{мн}}$ на три части, соответствующих группам водности.

К первой группе относятся годы, безусловно обеспеченные ($K_i \geq \alpha$), даже если в начале года водохранилище было опорожненным. Обеспеченность ее составит $P_\alpha = A_1$.

Ко второй группе относятся годы, условно перебойные ($\alpha \geq K_i \geq \alpha - \beta_{\text{мн}}$), так как в сочетании с предшествующими годами они могут оказаться необеспеченными. Вероятность этой группы сомнительных лет равна $N_2 = P_{\alpha - \beta} - P_\alpha$.

К третьей группе относятся годы, безусловно необеспеченные ($K_i < \alpha - \beta_{\text{мн}}$), даже если в начале года водохранилище было заполнено. Вероятность таких лет для первого года отбора $S_1 = 1 - P_{\alpha - \beta}$.

ТАБЛИЦА 14

Группы лет	Периоды сочетаний					
	первый год	вероятность	второй год	вероятность	третий год	вероятность
Бесперебойные годы	$K_i > \alpha$	A_1	$K_i + K_{i-1} > 2\alpha$	A_2	$\sum K_i > 3\alpha$	A_3
Условно перебойные годы	$\alpha > K_i > \alpha - \beta_{\text{мн}}$	N_2	$2\alpha > K_i + K_{i-1} > 2\alpha - \beta_{\text{мн}}$	N_3	$3\alpha > \sum K_i > 3\alpha - \beta_{\text{мн}}$	N_4
Перебойные годы	$K < \alpha - \beta_{\text{мн}}$	S_1	$K_i + K_{i-1} < 2\alpha - \beta_{\text{мн}}$	S_2	$\sum K < 3\alpha - \beta_{\text{мн}}$	S_3
Сумма вероятностей	$N = 1$		N_2		N_3	

Далее годы второй сомнительной группы исследуют с одним, двумя и несколькими предшествующими годами, то есть продолжают их рассортировку на безусловно обеспеченные и необеспеченные годы из группы условно-перебойных лет при сочетании их с предшествующими годами.

Сумма вероятностей $A_1 + N_2 + S_1 = 1 = N_1$. Последовательность отбора различных группировок лет приведена в таблице 14.

При завершении отбора обеспеченности p_{na} и $p_{na-\beta}$ практически смыкаются и группа условно перебойных (сомнительных) лет оказывается полностью рассортированной между безусловно бесперебойными и перебойными годами. При этом величина обеспеченности годовой отдачи равна:

$$p = A_1 + A_2 + \dots + A_n,$$

или

$$p = (1 - S) 100, \quad (75)$$

где n — число сочетаний кривых обеспеченностей условно перебойных лет с абсолютной кривой обеспеченности стока;
 A_i — вероятности безусловно бесперебойных лет по годам отбора согласно таблице 14.

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} S_i \text{ — вероятности перебойных лет.}$$

Для осуществления отбора не требуется описывать полностью все кривые обеспеченности. Достаточно определить обеспеченности ординат $n\alpha$ и $n\alpha - \beta_{\text{мн}}$ по годам.

Для отдельных лет вероятности перебойных лет составляют:

$$S_n = (1 - p_{na-\beta}) N_n. \quad (76)$$

Вероятности условно перебойных лет вычисляют по формуле:

$$N_{n+1} = (p_{na-\beta} - p_{na}) N_n. \quad (77)$$

Умножение на вероятность условно перебойных лет делают для учета удельного веса группировок при их погодном отборе.

Возможны разные способы сложения кривых обеспеченностей, например прием сложения двух кривых на координатном квадрате со сторонами, равными единице (рис. 81).

На одной стороне координатного квадрата строят абсолютную кривую обеспеченности стока x , а на другой — условную кривую обеспеченности сомнительных лет y . Необходимо построить кривую обеспеченности их суммы $z = x + y$ по годам отбора, до полного устранения сомнительных (условно перебойных) лет.

Кривую обеспеченности условно перебойных лет y делят на m равновеликих интервалов, по границам которых снимают величины ординат.

Ординате $n\alpha$ кривой обеспеченности условно перебойных лет соответствует нуль, а $n\alpha - \beta_{\text{мн}}$ — единица.

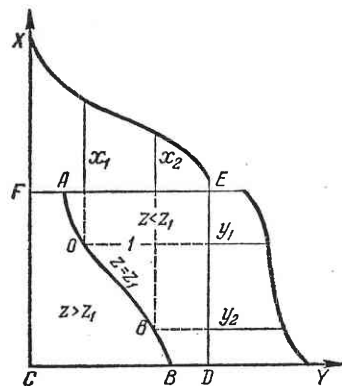


Рис. 81. Схема графо-аналитического расчета по М. В. Потопову.

чины ординаты суммарной кривой и находится по формуле трапеций:

$$P = \frac{1}{m} \left(\frac{P_0}{2} + P_1 + P_2 + \dots + \frac{P_m}{2} \right). \quad (78)$$

Задаваясь различными значениями ординат суммарной кривой, можно полностью описать ее. Однако при расчетах достаточно определить обеспеченность ординат $n\alpha$ и $n\alpha - \beta_{\text{мн}}$ суммарных кривых n -летних сочетаний (до окончательного отбора лет по двум группам водности. Расчет проводят до полной стабилизации обеспеченности годовой отдачи.

Способы сложения кривых обеспеченностей трудоемки. Практическому распространению и применению метода С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля в практике проектирования способствовали графики, разработанные Я. Ф. Плешковым:

$$p = \varphi(C_v, \beta_{\text{мн}}, \alpha) \text{ при } C_s = 2C_v. \quad (79)$$

При использовании графиков Я. Ф. Плешкова расчет многолетней составляющей полезной емкости предельно упростился: ее находят по гарантированной годовой расчетной обеспеченности и параметрах стока и отдачи.

Метод С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля нашел широкое применение в практике проектирования и способствовал дальнейшему углублению работ в области теории регулирования стока. В 1940 г. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель разработали метод определения полезной емкости водохранилища без предварительного разделения его на сезонную и многолетнюю составляющую.

Расчетный год делится на два сезона — половодье и межень. При расчетах учитывают коррелятивные связи между стоками в смежных сезонах. Связь между водностью смежных лет предполагается слабой.

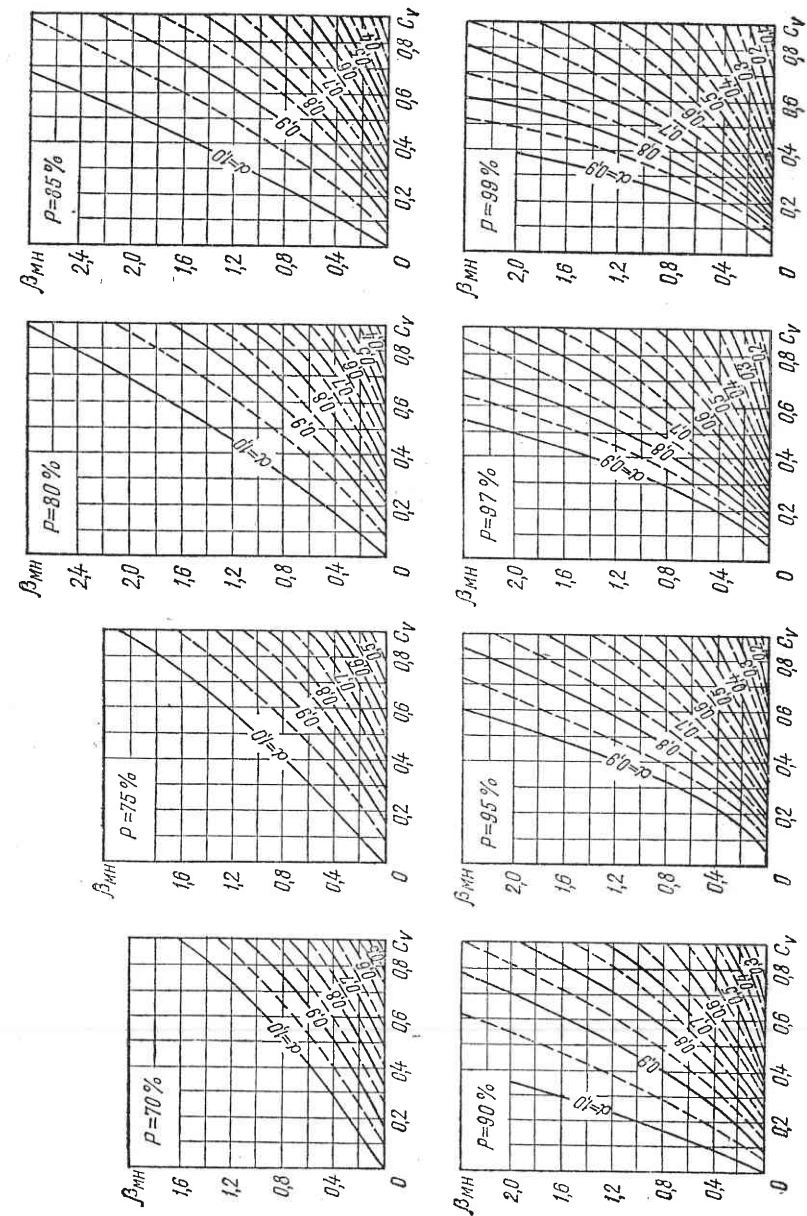


Рис. 82. Графики для расчета многолетней составляющей емкости при $C_s = 2C_v$, $r = 0$.

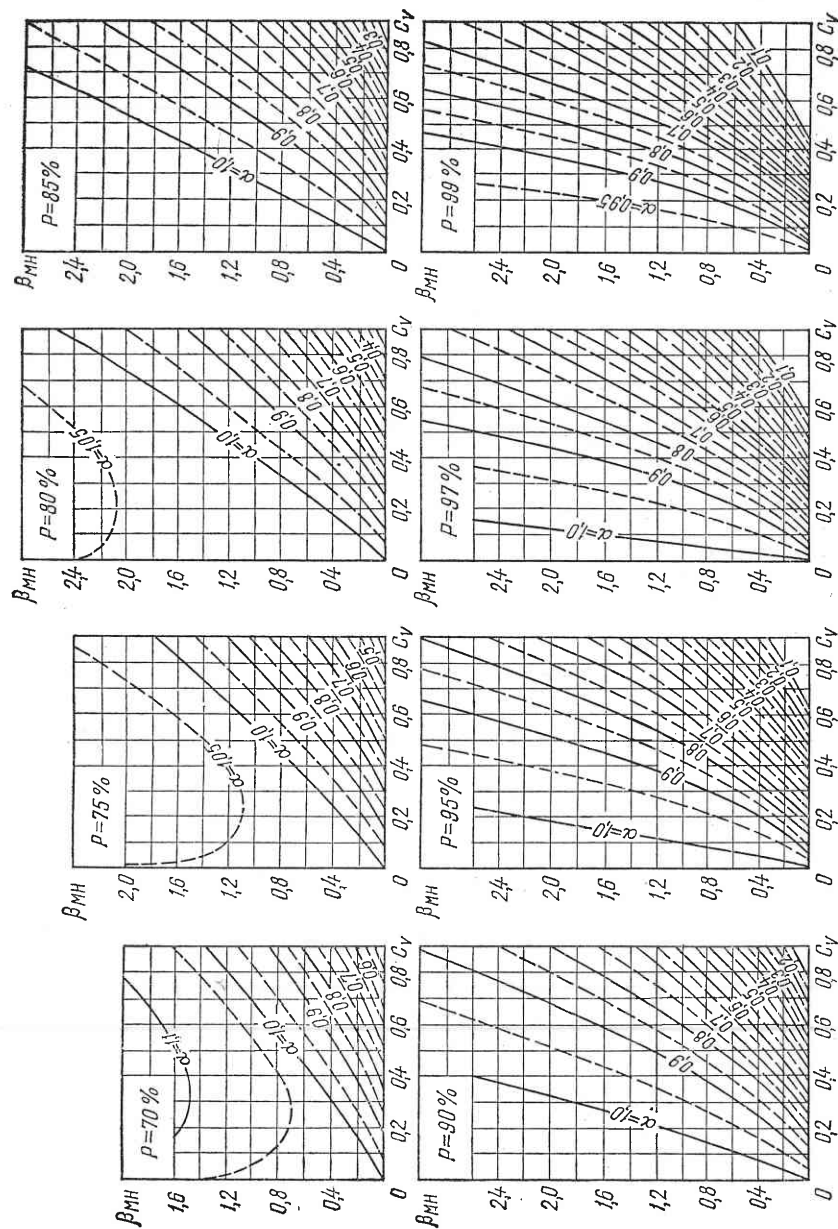


Рис. 83. Графики для расчета многолетней составляющей емкости при $C_s = C_v$, $r = 0$.

В 1959 г. С. Н. Крицкий и М. Ф. Менкель опубликовали методику учета коррелятивных связей между стоками смежных лет.

Предложен ряд графиков и номограмм для вычисления многолетней составляющей полезной емкости водохранилища. Из них наиболее известны графики Я. Ф. Плешкова, А. Д. Саваренского, Н. М. Милославского, И. В. Гуглия, Ш. Ч. Чокина, Г. Г. Сванидзе, В. В. Зубарева и А. Ш. Резниковского.

Наличие разработанных графиков, связывающих между собой величины p , α , β_{mn} , C_v , C_s , r , делает расчет многолетнего регулирования предельно простым.

Наибольшее количество факторов учитывается в графиках, разработанных Г. Г. Сванидзе, В. В. Зубаревым и А. Ш. Резниковским (рис. 82, 83).

Графики построены путем моделирования годовых значений стока методом статистических испытаний (Монте-Карло). На основании этих графиков можно определять α , β_{mn} и p .

Графики составлены для следующих обеспеченностей отдачи: $p = 70$; 75; 80; 85; 90; 95; 95; 97 и 99% при соотношениях между коэффициентами асимметрии и вариации $C_s : C_v = 1; 2; 4$ и при $r = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$. При $C_s = 2C_v$ и $r = 0$ указанные графики совпадают с графиками Я. Ф. Плешкова.

Графики А. Д. Саваренского (рис. 84) дают возможность определять и строить кривые обеспеченности наполнений водохранилища и дефицитов отдачи при разных сочетаниях значений α , β_{mn} , C_v .

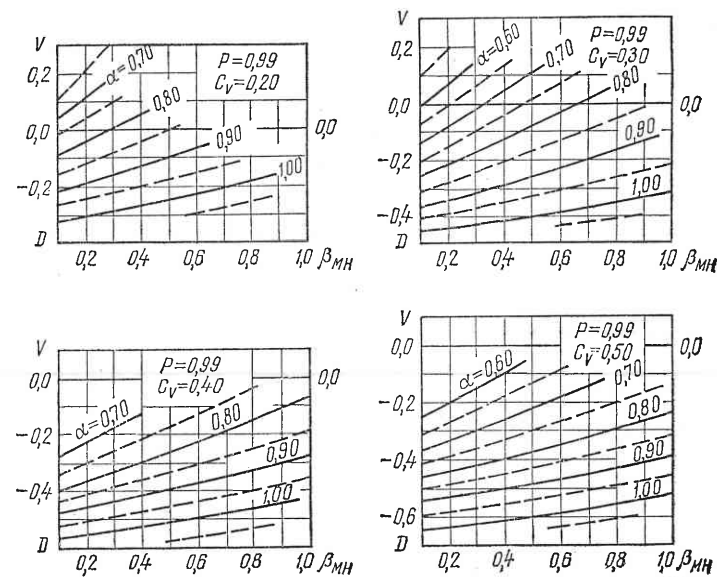


Рис. 84. Графики А. Д. Саваренского.

Учет коррелятивных связей между стоком смежных лет приводит иногда к значительному увеличению необходимой емкости водохранилища, обеспечивающей регулирование стока по сравнению с емкостью, вычисленной при $r=0$.

§ 5. Метод вероятных вариантов А. Д. Саваренского

Метод А. Д. Саваренского применяют как при сезонно-годовом, так и при многолетнем регулировании стока для орошения, водоснабжения, гидроэнергетики и т. д. По нему выполняют расчеты при неизменных, при изменяющихся условиях регулирования, а также при наличии коррелятивных связей между стоками смежных отрезков времени.

Для проектирования используют календарные ряды месячных или декадных объемов стока за период наблюдений или обработанные статистические ряды этих величин в виде фактических или теоретических кривых обеспеченности, нормы потерь, полной емкости и первоначального наполнения водохранилища, плановой отдачи или полезного водопотребления.

Полную емкость водохранилища делят на группы начальных наполнений и в каждой из них назначают среднее наполнение, называемое расчетным. Число групп расчетных наполнений бывает от 5 до 8. Расчетные наполнения ограничиваются предельными границами, соответствующими полной и мертвой емкостям. Первая группа соответствует мертвому объему, а последняя — полному.

Обеспеченности стока берутся в долях единицы. Количество точек кривой обеспеченности стока по возможности должно описать все его возможные колебания. Чаще всего в расчетах принимают следующие обеспеченности: $p = 0,05; 0,25; 0,50; 0,75; 0,80; 0,95; 0,97$.

Расчетные отрезки для балансового таблично-цифрового расчета внутригодового регулирования выбирают в зависимости от природных условий и требований на воду (сезон, месяц, декада). С уменьшением длительности отрезков времени значительно увеличивается вычислительная работа и часто возникает необходимость учета коррелятивных связей между стоками смежных отрезков времени, что усложняет расчет.

Вычисления проводят в несколько этапов: 1) выполняют балансовый таблично-цифровой расчет регулирования с учетом потерь для водохозяйственных лет различной водности при постоянной отдаче и принятых расчетных начальных наполнениях водохранилища; 2) строят по данным балансового расчета вспомогательный график результатов регулирования на конец первого отрезка времени (этот график представляет серию условных кривых обеспеченности конечных наполнений, сбросов и фактических отдач по числу начальных наполнений); 3) методом последовательных приближений по формуле полной вероятности находят безусловные кривые обеспеченности конечных наполнений по годам до полной стабилизации полученных значений вероятности по интервалам наполнений. Расчет по годам регулирования продолжают до тех пор, пока не наступит установившееся положение

искомой абсолютной кривой обеспеченности конечных наполнений. Конечные наполнения при этом не будут зависеть от принятого в первом году начального наполнения. Используя вычисленные значения вероятностей конечных наполнений по интервалам наполнений как исходные данные, находят абсолютные обеспеченности фактических отдач холостых сбросов и других искомых величин.

В таблице 15 приведена сокращенная схема балансового таблично-цифрового расчета, необходимого для построения вспомогательного графика результатов регулирования на конец первого отрезка времени. Расчет приведен для освоения метода вероятных вариантов и имеет иллюстративное значение. В качестве исходных приняты следующие данные: норма стока $W_0 = 1000$ млн. $m^3/год$; коэффициент вариации $C_v = 0,36$; коэффициент асимметрии $C_s = 0,72$; коэффициент корреляции $r = 0$. W_p — расчетные объемы стока при обеспеченностях от 0,05 до 0,95. Полезное водопотребление, или плановая отдача, $U_{пл} = 720$ млн. $m^3/год$. Нормы потерь в функции от наполнений водохранилища, полная емкость водохранилища $V_{нпу} = 569$ млн. $m^3/год$, мертвый объем $V_{м.о} = 50$ млн. m^3 . Приняты три годовых расчетных начальных наполнения: первое, равное мертвому объему $V_n = 50$ млн. m^3 , второе — среднему объему $V_{ср} = \frac{50+569}{2} = 310$ млн. m^3 , третье — полному объему при НПУ $V_n = V_{нпу} = 569$ млн. m^3 .

ТАБЛИЦА 15

n	V_n	p	W_p	$U_{пл}$	$V_{ф}$	V_k	Π	V'_k	S	D	$U_{ф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	50	0,05	1680	720	1010	569	13,8	569	427,2		720
	50	0,25	1210	720	540	540	13,7	526,3			720
	50	0,50	960	720	290	290	10,5	279,5			720
	50	0,85	640	720	—30	50	5,2	50		85,2	634,5
	50	0,95	490	720	—180	50	5,2	50		235,2	484,8
II	310	0,05	1680	720	1270	569	19,6	569	681,4		720
	310	0,25	1210	720	800	569	19,6	569	211,4		720
	310	0,50	960	720	550	550	19,1	530,9			720
	310	0,85	640	720	230	230	13,2	216,8			720
	310	0,95	490	720	80	80	12	68			720
III	569	0,05	1680	720	1529	569	26,8	569	922,2		720
	569	0,25	1210	720	1059	569	26,8	569	463,2		720
	569	0,50	960	720	809	569	26,8	569	213,2		720
	569	0,85	640	720	489	489	24,8	464,2			720
	569	0,95	490	720	339	339	20,2	318,8			720

Расчет проводят для трех групп начальных расчетных наполнений. Исходные данные записывают в графы 1—5 таблицы в следующем порядке: n — группа наполнений I, II, III, начальные расчетные наполнения V_n , обеспеченности стока p , расчетные объемы стока W_p и плановая отдача $U_{пл}$.

Фиктивные наполнения, не ограниченные емкостью водохранилища, вычисляют без учета потерь по соотношению $V_{ф} = V_n + W_p - U_{пл}$ (графа 6). Конечное наполнение без учета потерь (графа 7) определяют, исходя из следующих условий: если $V_{ф} > V_{нпу}$, то $V_k = V_{нпу}$, если $V_{нпу} > V_{ф} \geq V_{м.о}$, то $V_k = V_{ф}$, а если $V_{ф} \leq V_{м.о}$, то $V_k = V_{м.о}$.

Промежуточный расчет объема потерь не приводится. Объем потерь Π вычисляют в функции от среднего объема и нормы потерь $V_{\text{ср}} = \frac{V_n + V_k}{2}$. Фиктивное наполнение с учетом потерь равно $V'_\phi = V_\phi - \Pi$ (графа не приводится).

При вычислении графы 9 используют упомянутые условия к расчету графы 7, при которых конечное наполнение с учетом потерь V_k можно найти только в пределах $V_{\text{нпу}} \geq V_k \geq V_{\text{м.о.}}$. Объем холостого сброса S (графа 10) с учетом потерь находят как разность между фиктивным наполнением, не ограниченным емкостью, и полным объемом водохранилища при НПУ $S = V'_\phi - V_{\text{нпу}}$. Дефицит отдачи (графа 11) возникает, когда фиктивное наполнение, не ограниченное емкостью, с учетом потерь меньше мертвого объема: $D = V_{\text{м.о.}} - V'_\phi$. Фактическая отдача U_ϕ (графа 12) при отсутствии дефицита равна плановой $U_{\text{пл}}$ (графа 5); при наличии дефицита равна $U_\phi = U_{\text{пл}} - D$.

По данным балансового таблично-цифрового расчета строят вспомогательный график условных кривых обеспеченностей конечных наполнений с учетом потерь, холостых сбросов и фактических отдач для первого года регулирования.

Кривая обеспеченности любого результата регулирования, построенная с учетом только одного принятого начального наполнения, является условной. Для каждого из расчетных начальных наполнений есть своя условная кривая обеспеченности результата регулирования. Вспомогательный график условных кривых обеспеченности результатов регулирования строят в прямоугольных координатах. На оси абсцисс откладывают обеспеченности в долях единицы, взятые из графы 3 таблицы 15, а на оси ординат — объемы конечных наполнений с учетом потерь, холостых сбросов и фактических отдач (данные граф 9, 10, 12 — рис. 85, а).

Условные кривые обеспеченности холостых сбросов построены приближенно, так как для их построения недостаточно точек.

В части условных кривых обеспеченностей конечных наполнений с учетом потерь вспомогательный график включает три кривые по числу принятых в расчете начальных наполнений; они являются важнейшими характеристиками результатов регулирования и используются для вычисления и построения безусловной кривой обеспеченности рассматриваемой величины. Безусловную (абсолютную) кривую обеспеченности конечных наполнений рассчитывают и строят с учетом всех начальных расчетных наполнений.

Для вычисления безусловной кривой обеспеченности конечного наполнения применяют формулу полной вероятности:

$$(V_k)_n = \sum_{V_{\text{м.о.}}}^{V_{\text{нпу}}} (V_k)_y (V_n)_n = \sum_{V_{\text{м.о.}}}^{V_{\text{нпу}}} (P_i - P_{i-1}) (V_n)_n, \quad (80)$$

где $(V_k)_n$ — безусловная вероятность конечного наполнения в n -м году;
 $(V_n)_n$ — безусловная вероятность начального наполнения в n -м году;
 $(V_k)_y$ — условная вероятность конечного наполнения V_k при принятом начальном наполнении V_n . Условные вероятности берут по заданным интервалам конечных наполнений.

Для первого года регулирования безусловные вероятности начальных наполнений по интервалам принятых конечных наполнений равны единице. С каждой условной кривой обеспеченности конечных наполнений вспомогательного графика снимают условные вероятности конечных наполнений с учетом потерь, которые остаются постоянными на период регулирования

$$(V_k)_y = P_i - P_{i-1}, \quad (81)$$

где P_i — обеспеченность наименьшего в интервале конечного наполнения с учетом потерь;

P_{i-1} — обеспеченность наибольшего в интервале наполнения.

Произведение условной вероятности конечного наполнения в интервале на безусловную вероятность его начального наполнения составляет частную вероятность конечного наполнения с учетом потерь:

$$(V_k)_i = (V_k)_y (V_n)_i. \quad (82)$$

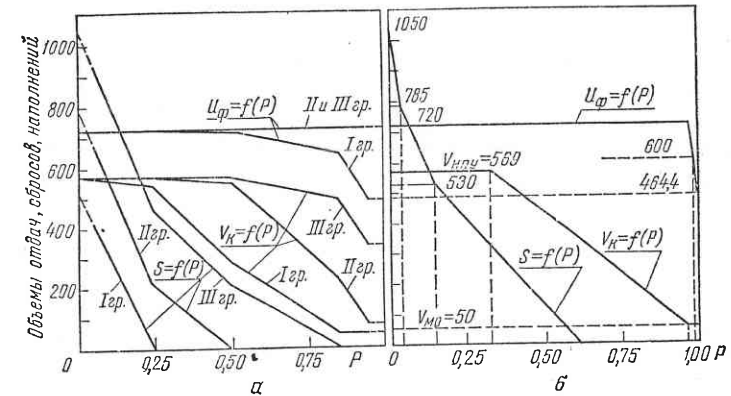


Рис. 85. Вспомогательные графики:

а — условных кривых обеспеченности конечных наполнений фактической отдачи, холостых сбросов; б — безусловных кривых обеспеченности тех же величин.

Для первого года регулирования безусловные вероятности конечных наполнений по интервалам последних вычисляют при одном (безразлично каком) начальном наполнении по зависимости (80). Вычисленные вероятности конечных наполнений по интервалам для первого года принимают за вероятности начальных наполнений соответствующих интервалов второго года.

Начиная со второго года регулирования проводится погодовой расчет безусловных вероятностей конечных наполнений по интервалам последних с использованием формулы полной вероятности (80). Частные вероятности конечных наполнений по вертикали суммируют по интервалам в пределах года, что дает возможность получить полную вероятность конечного наполнения для данного или начального наполнения последующего года. Стабилизация безусловных или полных вероятностей конечных наполнений в интервалах последних при многолетнем регулировании стока наступает не сразу, а охватывает период нескольких лет.

При сезонно-годовом регулировании стока при одном возможном начальном наполнении стабилизация кривых обеспеченностей результатов регулирования наступает не позднее второго года, то есть результаты расчета одного года являются устойчивыми.

При установившемся состоянии безусловная кривая обеспеченности конечных наполнений не зависит от расчетных наполнений первого года, при этом вероятности конечных наполнений по интервалам n -го года равняются соответствующим величинам $n+1$ -го года:

$$(V_k)_{nn} = (V_k)_n. \quad (83)$$

В таблице 16 приведен расчет полной вероятности конечных наполнений по интервалам последних при многолетнем регулировании стока.

Для первого года регулирования при построении графа таблицы используется вспомогательный график условных кривых обеспеченностей конечных наполнений, построенный по данным таблицы 15. Запись необходима для последующего погодового расчета, начинающегося со второго года регулирования. Для всех лет регулирования построено графа вторая содержит объемы принятых расчетных наполнений соответствующих интервалов последних $V_{\text{м.о.}}$, $V_{\text{ср}}$ и $V_{\text{нпу}}$. Вероятность принятых или заданных в начале расчета наполнений равна единице (графа 3) для первого расчетного отрезка времени (год). В графах (4, 5, 7) над чертой для всех лет регулирования записаны условные вероятности конечных наполнений, получаемые при обработке данных, снятых с соответствующих условных кривых обеспеченностей вспомогательного графика по интервалам (см. рис. 85, а).

Для различных кривых эти вероятности по интервалам следующие:

при $V_n = V_{м.о}$ 1—0,85; 0,85—0,05; 0,05—0;

при $V_n = V_{ср}$ 1—0,95; 0,95—0,25; 0,25—0;

при $V_n = V_{плу}$ 1—1; 1—0,50; 0,50—0.

Умножением вероятностей начальных наполнений из графы 3 на условные вероятности конечных наполнений построчно (данные граф 4, 5, 6 над чертой) получают так называемые частные вероятности, которые и записывают в те же графы под чертой. Для первого года эта операция не изменяет вероятности по интервалам, так как умножают на единицу. Один из трех возможных вариантов начального наполнения в примере ($V_n = V_{плу}$) принимают за основной с вероятностями по интервалам в конце первого года равными 0, 0,50 и 0,50 (данные под чертой). Полученные величины записывают в графу 3 для второго года регулирования как полные вероятности начальных рас-

ТАБЛИЦА 16

Периоды	Начальные наполнения и их вероятности		Условные, частные и полные вероятности конечных наполнений по интервалам		
	V_n	(V_n)	50—50	50—569	569—569
1-й год	50	1	1—0,85 0,15	0,85—0,05 0,80	0,05—0 0,05
	310	1	1—0,95 0,05	0,95—0,25 0,70	0,25—0 0,25
	569	1	1—1 0,00	1—0,50 0,50	0,50—0 0,50
Принятая полная вероятность (V_k)			0	0,50	0,50
2-й год	50	0	0,15 0	0,80 0	0,05 0
	310	0,50	0,05 0,025	0,70 0,35	0,25 0,125
	569	0,50	0 0	0,50 0,25	0,50 0,25
Полная вероятность конечного наполнения (V_k)			0,03	0,60	0,37
3-й год	50	0,03	0,15 0,004	0,80 0,024	0,05 0,002
	310	0,60	0,05 0,03	0,70 0,42	0,25 0,15
	569	0,37	0 0	0,50 0,185	0,50 0,185
Полная вероятность конечного наполнения (V_k)			0,03	0,63	0,34
	50	0,03	0,15 0,004	0,80 0,024	0,05 0,002
	310	0,63	0,05 0,031	0,70 0,441	0,25 0,158
	569	0,34	0 0	0,50 0,17	0,50 0,17
Полная вероятность конечного наполнения (V_k)			0,035	0,635	0,33

четных наполнений. Построчно перемножают данные графы 3 на условные вероятности конечных наполнений, постоянные значения которых приведены в графах 4, 5, 6 для всех лет регулирования. Полученные произведения записывают под чертой в тех же графах как частные вероятности. Частные вероятности конечных наполнений суммируют по вертикали для трех интервалов (графы 4, 5, 6) в пределах года. Полученные суммы представляют вероятности начальных наполнений третьего года или вероятности конечных наполнений второго года в пределах интервалов. В примере расчет заканчивается четвертым годом, при котором вероятности конечных наполнений мало отличаются от аналогичных величин по интервалам для третьего года. По данным последней строки таблицы 16 для конца четвертого года регулирования строят безусловную кривую обеспеченности конечных наполнений (рис. 85, б). Число лет регулирования до стабилизации абсолютной кривой обеспеченности конечных наполнений определяет период первоначального наполнения водохранилища.

Для определения и дальнейшего построения абсолютных кривых обеспеченностей фактических отдач и холостых сбросов, равно как и других результатов регулирования, используют вспомогательные графики условных кривых обеспеченности искомым величин (см. рис. 85, а) и значения вероятностей конечных наполнений при принятых расчетных начальных наполнениях, взятые при завершении расчета таблицы 16 по последнему году со стабильным значением вероятностей по интервалам конечных наполнений. Расчет проводят аналогично вычислению вероятности конечных наполнений по формуле полной вероятности в таблице 17.

$$(U_{\phi}) = \sum_{U_{\min}}^{U_{\max}} (U_{\phi})_y (V_n), \quad (84)$$

где (U_{ϕ}) — полная вероятность фактических отдач;

$(U_{\phi})_y$ — условная вероятность фактических отдач при заданном начальном наполнении V_n ;

(V_n) — полная вероятность конечного наполнения, которая берется по таблице 16 и принимается за вероятность начального наполнения в расчете по формуле 84.

За предельную нижнюю границу условной кривой обеспеченности фактических отдач принимают $U_{\min}$ — $U_{\min}$, а за верхнюю — $U_{\max}$ — $U_{\max}$. Намечают интервалы возможных значений фактических отдач в заданных границах и при помощи вспомогательного графика (рис. 85, а) находят условные вероятности для каждой условной кривой обеспеченности, соответствующей принятым начальным наполнениям.

Расчет полной вероятности фактических отдач аналогичен расчету вероятности конечных наполнений.

В графу 2 по интервалам принятых начальных наполнений записывают конечные результаты расчета по таблице 16. Над чертой в графах 3, 4, 5, 6 таблицы 17 записывают условные вероятности фактических отдач по их интервалам, вычисленные

ТАБЛИЦА 17

Начальное наполнение и его вероятность		Условные, частные и полные вероятности фактических отдач по интервалам			
V_n	(V_n)	484,8—484,8	484,8—600	600—720	720—720
50	0,035	1—1 0	1—0,87 0,004	0,87—0,50 0,013	0,50—0 0,018
310	0,635	1—1 0	1—1 0	1—1 0	1—0 0,635
569	0,330	1—1 0	1—1 0	1—1 0	1—0 0,330
Полная вероятность фактических отдач (U_{ϕ})		0,00	0,004	0,013	0,983

ТАБЛИЦА 18

Начальное наполнение и его вероятность		Условные, частные и полные вероятности сбросов по интервалам				
V_n	(V_n)	0—0	0—530	530—785	785—1050	1050—1050
50	0,035	1—0,25 0,026	0,25—0 0,009	0—0 0	0—0 0	0—0 0
310	0,635	1—0,50 0,318	0,50—0,12 0,241	0,12—0 0,076	0—0 0	0—0 0
569	0,330	1—0,85 0,049	0,85—0,22 0,208	0,22—0,12 0,033	0,12—0 0,040	0—0 0—0
Полная вероятность сбросов (S)		0,393	0,458	0,109	0,040	0

при помощи вспомогательного графика для каждого начального наполнения. Суммируя данные расчета под чертой (графы 3, 4, 5, 6) в пределах заданных границ интервалов в вертикальном порядке, получают полные вероятности фактических отдач. По результатам расчета строят абсолютную кривую обеспеченности фактических отдач (рис. 85, б).

Расчет для нахождения абсолютной кривой обеспеченности холостых сбросов приведен в таблице 18. При расчете используют также формулу полной вероятности:

$$(S) = \sum_0^{S_{\max}} (S)_y (V)_n, \quad (85)$$

где (S) — полная вероятность холостых сбросов;

$(S)_y$ — условная вероятность холостых сбросов при принятом начальном наполнении водохранилища V_n ;

$(V)_n$ — полная вероятность начального наполнения при установившейся кривой обеспеченности наполнений.

Предельными границами интервалов холостых сбросов служат 0—0 и $S_{\max}$ — $S_{\max}$; $S_{\max} = 1050$. Над чертой записывают условные вероятности, полученные при обработке данных, снятых с условных кривых обеспеченностей холостых сбросов по границам интервалов при начальных наполнениях. Расчетom находят полные вероятности холостых сбросов по интервалам последних.

Подобным же образом определяют кривые обеспеченности и другие результаты регулирования стока (мощностей, энергоотдач и др.). Для расчетов предложены аналитические уравнения, позволяющие избежать построения вспомогательных графиков, разработана программа расчета по методу вероятных вариантов на электронно-вычислительных машинах.

Для гидроэнергетики метод используется в следующем виде. Вспомогательный балансовый расчет выполняется как при расчете водно-энергетического регулирования по ряду стока, то есть в расчетную таблицу вводят уровень нижнего бьефа, напор брутто, потери напора, напор нетто, мощность и выработку энергии. Вспомогательный график, кроме условных кривых обеспеченности наполнений, включает водоотдачу и сбросы, а также кривые условной обеспеченности мощностей и энергоотдач. Расчеты полных вероятностей мощностей и энергоотдач не отличаются от изложенных выше для водоотдач и сбросов.

Некоторые программы для расчетов регулирования указанным методом при помощи электронно-вычислительных машин разработаны в Московском гидромелиоративном институте и во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидротехники и мелиорации.

Глава VII. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА

§ 1. Регулирование стока на переменные оросительные нормы

Широкое внедрение орошения сельскохозяйственных культур за пределами засушливой зоны потребовало разработки методики расчета водохранилищ на нормы орошения, которые могут быть переменными и отражать колебания погодных условий и естественного увлажнения.

В зоне достаточного увлажнения часть потребности в воде сельскохозяйственных культур обеспечивается естественными осадками и влагозапасами в почве. В засушливые годы для питания растений требуются дополнительные большие объемы воды из водохранилища. В годы повышенной влажности при достаточном количестве осадков во время вегетации расход воды из водохранилища сокращается до минимума. При расчете водохранилищ на переменные оросительные нормы учитывается зависимость последних от тех или иных гидрометеорологических факторов (осадки, дефицит влажности, продуктивные влагозапасы).

Оросительные нормы изменяются в широких пределах и зависят от осадков в период вегетации и других климатических факторов, которые могут быть не связаны непосредственно с водностью года или периода вегетации. Маловодный год или его межень не обязательно бывают засушливыми.

В зоне переменного увлажнения оросительные нормы по годам могут меняться несколько раз. При расчете на максимальное водопотребление по маловодному расчетному году для надежности делается двойной запас емкости водохранилища и отдачи. При этом уменьшается орошаемая площадь и сток полностью не используется. При переменной площади орошения обеспечивается более рациональное использование стока и снижение удельной стоимости орошения.

Для расчета водохранилищ на переменные оросительные нормы применяют различные методы. Расчет проводят с применением календарных рядов наблюдений и обобщенными способами. При наличии календарного ряда гидрометрических наблюдений проводят сопоставительные расчеты по балансовому методу. В расчетах используются наблюдаемые расходы и оросительные нормы для каждого конкретного года с его погодными условиями. В балансовые таблицы полученные отдачи вводят по годам периода регулирования. Изменчивость водопотребления при этом учитывается автоматически и не зависит от наличия или отсутствия коррелятивной связи стока с отдачей. Требуется лишь выполнить условие правильного назначения отдачи для

каждого конкретного года в зависимости от одного из климатических факторов и пользоваться этой зависимостью при эксплуатации.

Для приближенных расчетов многолетнего регулирования стока на переменные оросительные нормы принимают следующие положения и допущения. Обеспеченность отдачи p_a равна дополнению до 100% обеспеченности годового стока $p_a = 100 - p$, где p — обеспеченность годового стока. Отдача и сток — переменные величины, имеют единый закон распределения. Дефицит стока зависит от двух переменных стока и отдачи.

Многолетнюю составляющую полезной емкости водохранилища находят следующим путем. По календарному ряду гидрометрических наблюдений вычисляют его статистические параметры (норму, коэффициенты изменчивости и асимметрии) и строят кривую обеспеченности стока. Аналогичный прием обработки применяют и в отношении оросительных норм. Для ряда их значений проводят статистическую обработку, вычисляют коэффициенты ряда и строят кривую обеспеченности отдачи. Многолетнюю составляющую полезной емкости приравнивают максимуму дефицита:

$$\beta_{\text{мн}} = D_{\text{макс}} = (\alpha_0 K_{p_{\text{ан}}} - K_{p_n}) n, \quad (86)$$

где α_0 — осредненный коэффициент зарегулирования (норма);

K_{p_n} — модульный коэффициент стока за n лет, равный

$$\frac{C_v}{V_n} \Phi_{p+1};$$

n — число лет, при котором образуется максимальный дефицит;

$K_{p_{\text{ан}}}$ — модульный коэффициент отдачи за n лет, равный

$$\frac{C_{v_a}}{V_n} \Phi_{100-p} + 1;$$

$C_{v_{\text{ан}}}$ — коэффициент изменчивости отдачи за n лет, равный $\frac{C_{v_a}}{V_n}$.

На недостатки данного приема расчета обращали внимание многие исследователи. М. В. Потапов, отмечая его приближенность, указывал, что величину допускаемой ошибки при этом нельзя точно определить. Метод исходит из неявного предположения об отсутствии какой-либо связи между годовым стоком и годовой оросительной нормой.

М. В. Потапов предложил применять при расчете графоаналитический прием сложения кривых обеспеченностей стока и отдачи при наличии и отсутствии коррелятивной связи между стоком и отдачей.

При отсутствии коррелятивной связи между стоком и отдачей принимают следующий порядок расчета. На двух сторонах координатного квадрата, равных единице, строят кривые обеспеченности стока и отдачи. Кривую обеспеченности стока обозначают через x , а кривую обеспеченности отдачи — через y . Задаются величиной $z_1 = f(x, y)$. Имея величину y_1 , снятую с кривой обеспеченности, находят $x_1 = z_1 - y_1$. Точка пересечения ординат x_1 и y_1 в координатном квадрате соответствует значению z_1 . При следующих значениях y находят x и точки их пересечения. Соединяя полученные точки, получают кривую с равными значениями z . Отношение площади, ограниченной кривой и

сторонами квадрата, дает искомое значение обеспеченности z_1 . Поступая аналогично и для других z_i строят ее кривую обеспеченности и находят z_p .

Имеется также и расчет при наличии коррелятивной связи между стоком и отдачей графоаналитическим способом М. В. Потапова.

§ 2. Компенсирующее регулирование стока

В случае компенсирующего регулирования стока водохранилище располагается на реке или ее притоке выше по течению створа водоприемника.

Водохранилищем регулируется сток лишь с части всего водосбора. Сток с остальной водосборной площади от водохранилища до створа водоприемника остается незарегулированным.

Простейшая схема компенсирующего водохранилища состоит из двух установок: верхней, которая включает водохранилище с плотинной и регулирует сток только части бассейна, и нижней, которая забирает его со всего бассейна.

Пока нижняя установка обеспечивается стоком с незарегулированной части бассейна, водохранилище не срабатывается.

Во время половодья или паводков этого стока с площади водосбора между установками оказывается вполне достаточно, чтобы удовлетворить водопотребление или водопользование у нижнего створа. Когда незарегулированный сток выше требуемой отдачи, в верхнем водохранилище аккумулируется сток и происходит сброс лишь санитарного расхода в нижний бьеф (либо расхода воды, обеспечивающего бесперебойную работу промышленных и коммунальных водозаборов, расположенных на участке от створа верхней до створа нижней установки).

Санитарный расход ниже водохранилища принимают постоянным, равным минимальному зимнему или летнему расходам.

Из водохранилища в период межени, когда сток с незарегулированной части водосбора не обеспечивает заданной отдачи в нижнем створе, делаются попуски для компенсации дефицитов расходов. Водохранилище работает в сложных условиях, расходы попусков изменяются в широких пределах: во время половодья они снижаются до минимума, в другие периоды сглаживают колебания расходов с незарегулированной части водосбора.

Режим работы компенсирующего регулирования стока подчинен получению наибольшей отдачи в нижнем створе. Требуемая емкость водохранилища при компенсирующем регулировании стока больше, чем для выравнивания стока только своего бассейна. Тем не менее путем компенсирующего регулирования нередко возможно относительно небольшим водохранилищем на притоке зарегулировать сток большого бассейна. Это зависит от соотношения расходов с зарегулированной части бассейна к дефицитам стока всего бассейна в створе нижней установки.

Расчет многолетнего и сезонного компенсирующих водохранилищ проводят по календарным рядам стока, составленным на основании

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ — расход, аккумулированный между входным и выходным створами в водохранилище;

$q_{\text{вых}}$ — средний расход, полученный по гидрометрическим данным в створе гидроузла;

Δt — расчетный период осреднения (секунда, сутки).

Противопаводочная емкость, предназначенная для регулирования высокого стока, может состоять из двух или одной частей, в зависимости от сработки водохранилища и конструкции сбросных сооружений.

Вверх по водохранилищу отметки уровней воды постепенно повышаются по кривой подпора, достигая наибольшего значения в зоне выклинивания подпора. В зависимости от величины притекающих максимальных расходов кривая подпора имеет различные отметки.

Балансовые расчеты выполняют или в два (гидрологический и водохозяйственный), или в три этапа (совместно с гидравлическим). Балансовые расчеты проводят по статистическим или динамическим емкостям.

Когда амплитуда колебаний уровней в реке в естественных условиях меньше величины подпора, можно не учитывать изменение отметок уровня по длине подпорного бьефа.

Уровни в водохранилище принимают горизонтальными, а вычисленные емкости водохранилища по высоте подпора называют статистическими. Если определяется форма свободной поверхности и при вычислении емкостей водохранилища учитывается негоризонтальность уровней и повышение их отметок по длине подпора, то емкости называются динамическими. Расчет по динамическим емкостям применяют для ответственных объектов проектирования и проводят гидравлическими методами.

По длине подпорного бьефа происходит изменение гидравлики движения волн высоких вод. Скорость добегания воды в водохранилище от входного до выходного створа по сравнению со скоростью добегания по руслу увеличивается, что следует учитывать при пропуске высоких вод. Правила предстоящей эксплуатации водохранилищ, условия пропуска максимальных расходов в нижний бьеф подлежат учету.

Основными данными для расчета регулирующего влияния водохранилищ являются: гидрограф половодья (паводка), объемная или топографическая характеристика водохранилища и тип водосбросного сооружения.

Гидрографы половодий (паводков) формируются природными факторами и не зависят от размеров сооружений и водохранилища.

Основными параметрами расчетных гидрографов являются: величина максимального расхода; длительность половодья или паводка; объем стока высоких вод; асимметрия гидрографа; очертание фазы подъема и спада.

Форма расчетного гидрографа при наличии наблюдений принимается по модели одного из наблюдаемых гидрографов или по теоретической схеме (уравнению гидрографа). Для перехода от модели к расчетному гидрографу делается пересчет координат гидрографа модели в координаты

расчетного гидрографа. Пересчет делают не только для расходов, но и для объемов. Гидрограф должен удовлетворять принятой норме вероятности превышения по обоим параметрам.

Расходы половодья или паводка и объемы, взятые за модель пересчитывают по соотношениям:

$$Q_i = Q_{im} \frac{Q_p}{Q_m} \text{ м}^3/\text{сек}; \quad (88)$$

для абсцисс (половодье)

$$t_i = t_{im} \frac{\bar{M}_m \bar{h}_p}{\bar{M}_p \bar{h}_m} \quad (89)$$

или в более общем виде для абсцисс по переходному коэффициенту

$$K = \frac{W_p}{W_m} \frac{\bar{Q}_m}{\bar{Q}_p}, \quad (90)$$

где Q_i, t_i — текущие координаты расчетного гидрографа;

Q_{im}, t_{im} — текущие координаты гидрографа модели;

$\bar{Q}_p, \bar{M}_p, \bar{h}_p$ — среднесуточный максимальный расход, модуль стока и слой стока заданной вероятности превышения;

$\bar{M}_m$ — среднесуточный максимальный модуль модели стока, л/сек в 1 см²;

$\bar{h}_m$ — слой стока половодья модели, мм;

W_p, W_m — объемы стока — расчетный и модели.

Построение расчетных гидрографов половодий и паводков при достаточном обосновании можно вести по теоретическим схемам или уравнениям. При отсутствии и недостаточности гидрометрических наблюдений применяют схематизацию расчетных гидрографов половодья (паводка).

Для схематизации гидрографов предложен ряд способов: Д. И. Кочерин схематизирует гидрографы половодий и паводков по треугольнику и трапеции, Д. Л. Соколовский — по параболическим кривым, сходящимся в вершине. Имеются и другие предложения (А. В. Огиевский, С. Н. Крицкий, М. Ф. Менкель, Г. А. Алексеев). Для построения расчетного гидрографа половодья с одной вершиной для средних и малых рек нормами проектирования рекомендуется применять (по Г. А. Алексееву) уравнение:

$$y = 10^{-\frac{a(1-x)^2}{x}}, \quad (91)$$

где $y = \frac{Q_i}{Q_m}$ — расход в долях от максимального расхода заданной обеспеченности;

$x = \frac{t_1}{t_n}$ — время от начала паводка, выраженное в долях от продолжительности подъема половодья;

a — параметр, характеризующий форму гидрографа паводка и зависящий от несимметричности половодья (находится по таблице СН 356-66).

Схематизация гидрографа расчетного половодья (паводка) влияет на результаты расчета. Фигуры (прямоугольник, трапеция) являются более опасными, чем треугольник и парабола.

Гидрографы сбросных расходов менее связаны с гидрографами притока, чем с конструктивными особенностями сооружений, параметрами водохранилища и особенностями его эксплуатации. На сбросные расходы оказывают влияние ограничения максимальных расходов воды, допускаемых к пропуску в нижний бьеф, порядок открытия судопропускных шлюзов и ход наполнения водохранилища, уровень сработки водохранилища к началу половодья или паводка и другие факторы.

Основными конструкциями сбросных сооружений являются водосливы и водовыпускные отверстия. Они обеспечивают пропуск расчетных максимальных расходов половодья, дождевых паводков и неиспользуемых расходов воды в нижний бьеф; полезные и санитарные пропуски воды из водохранилища; пропуск льда, шуги, сора из верхнего бьефа в нижний, если такое требование предъявляется по условиям эксплуатации гидроузла.

Водосливы практического профиля устраивают со щитами на гребне или без щитов.

При расчете водослива применяют формулу:

$$q = mb \sqrt{2g h_0^{3/2}}, \quad (92)$$

где b — ширина водослива;

h_0 — напор над гребнем водослива.

Для отверстия водовыпуска формула имеет вид:

$$q = \mu \Omega \sqrt{2g H_0}, \quad (93)$$

где H_0 — напор над серединой отверстия; при расчете труб водопусков напор обычно берется от отметки дна на выходе;

Ω — площадь отверстия.

Наибольшее регулирующее воздействие на максимальный расход оказывают сифонные водосбросы или донные отверстия и водосливы со щитами, а наименьшее — водосливы без затворов при расположении их гребня на отметке НПУ.

Водосливы без затворов, как правило, применяют на малых водотоках с ливневым характером стока при минимально возможном затоплении в условиях, когда время наступления максимума нельзя предвидеть. Во всех других случаях целесообразно использовать донные водопуски или водосливы со щитами. Для определения объема аккумуляции воды в водохранилище служит объемная или топографическая характеристика.

Для водосливов без затворов возможные ошибки от недоучета типа объемных характеристик составляют 10—15%, для водоспусков и водосливов со щитами — 3—5%. Ошибки или погрешность расчета могут быть как в сторону преуменьшения, так в сторону преувеличения сбросных расходов.

§ 1. Расчеты регулирования половодий

Регулирующее влияние водохранилища проявляется в том, что происходит аккумуляция стока воды и в зависимости от емкости, предназначенной для этих целей, производится срезка максимального расхода воды расчетной вероятности превышения до величины, заданной для водопропускных сооружений гидроузла.

Сбросные сооружения рассчитывают, исходя из выбора оптимального варианта, обеспечивающего минимум затрат на сооружения, затопление и подтопление, сохранность и надежность работы, простоту эксплуатации всего узла и водохранилища. В общем виде уравнение баланса воды в водохранилище за время dt выражается формулой:

$$Q dt = q dt \pm \omega dh,$$

где Q — расчетный расход во входном створе водохранилища;

q — расход в створе водосбросных сооружений (сброс);

ω — площадь зеркала водохранилища.

Расход аккумуляции в водохранилище равен:

$$Q - q = \pm \omega \frac{dh}{dt}, \quad (94)$$

где $\frac{dh}{dt}$ — приращение уровня воды при подъеме и спаде половодья.

Зависимость расхода, притекающего в водохранилище (сток), и сброса выражается дифференциальным уравнением, точное интегрирование которого затруднено и возможно лишь при $Q = \text{const}$, то есть при прямоугольном гидрографе притока. При детальных балансовых расчетах (аналитических, графо-аналитических и графических) применяют различные приемы приближенного интегрирования.

При приближенном интегрировании весь период паводка делится на конечные интервалы времени, достаточно малые для того, чтобы в течение их расходы притока и сбросной расход можно было считать изменяющимися линейно. Желательно, чтобы одна из границ расчетных интервалов совпадала с максимальной ординатой расчетного гидрографа половодья, паводка и интервалы были постоянными.

Уравнение (94) с конечными интервалами времени примет вид:

$$\frac{Q_n + Q_k}{2} \Delta t = \frac{q_n + q_k}{2} \Delta t + V_k - V_n; \quad (95)$$

$$\frac{Q_n + Q_k}{2} - \frac{q_n + q_k}{2} = \frac{V_k - V_n}{\Delta t}, \quad (96)$$

где индексы n и k относятся к началу и концу расчетного интервала времени.

При графо-аналитических приемах расчета основное уравнение записывается в виде:

$$V_k - V_n = Q_{cp} \Delta t - \frac{1}{2} q_n \Delta t - \frac{1}{2} q_k \Delta t, \quad (97)$$

или

$$V_k + \frac{1}{2} q_k \Delta t = Q_{cp} \Delta t + \left(V_n + \frac{1}{2} q_n \Delta t \right) - q_n \Delta t. \quad (98)$$

В уравнениях неизвестными являются сбросной расход q_k и объем водохранилища V_k на конец интервала, они сгруппированы в левой части уравнения и зависят от уровня воды в водохранилище.

В результате расчета находят ординаты гидрографа сбросных расходов. Резервная емкость, или емкость форсировки (для случая, когда водохранилище перед паводком наполнено до НПУ), соответствует максимальному наполнению водохранилища на спаде паводка. Сбросные расходы вычисляют в зависимости от параметров водопропускных сооружений и емкости водохранилища.

Аналитический или табличный расчет выполняют подбором. Исходными данными для расчета служат расчетный гидрограф паводка, тип сбросного сооружения и объемная характеристика водохранилища.

Порядок расчета следующий. Имеется сбросное сооружение, например водослив с гребнем на отметке НПУ. Задаются величинами слоя форсировки над гребнем водослива.

Для различных значений слоя вычисляют сбросные расходы по формуле водослива $q = \varphi(h_0)$, а по объемной характеристике находят емкости водохранилища над НПУ (емкости форсировки) $V_{\phi} = f(h_0)$.

На основе данных таблицы строят кривую $q = \varphi(V_{\phi})$ (рис. 87, а).

В таблице 20 q_1 — расход на метр ширины водослива $q = q_1 b$, где b — ширина водослива.

ТАБЛИЦА 20

№ интервала	h_0 , м	q_1 , м ³ /сек	q , м ³ /сек	V_{ϕ} , м ³
1	2	3	4	5

Дальнейший расчет проводят в табличной форме (табл. 21)

ТАБЛИЦА 21

№ интервала	Q_n	Q_k	$\frac{Q_n + Q_k}{2} \Delta t$	q_n	q_k	$\frac{q_n + q_k}{2} \Delta t$	V_n	V_k
1	2	3	4	5	6	7	8	9

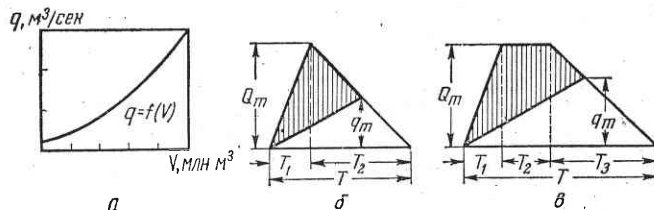


Рис. 87. К расчету емкости форсировки и схематизации паводка:

а — график $q = f(V)$; б — треугольник; в — трапеция.

Для первого расчетного интервала расход притока и сбросной расход равны нулю. Величину расхода притока в конце интервала берут по гидрографу половодья паводка, после чего находят объем стока за интервал. Сбросным расходом в конце интервала задаются, а начальный сбросной расход q_n известен. Вычисляют объем стока за интервал.

Объем водохранилища над уровнем НПУ в конце интервала подсчитывают по формуле:

$$V_k = V_n + Q_{cp} \Delta t - q_{cp} \Delta t \quad (99)$$

На кривой $q = f(V)$ находят расход q_k . Если он не равен заданному, делают вторую пробу, то есть задаются новой величиной сбросного расхода до равенства $q_k = q'_k$. Конечное значение расхода стока Q_k , сбросного расхода q_k и емкости V_k одного интервала является начальным для последующего интервала.

При некоторых графических расчетах используют суммарные кривые притока. Имеются графические методы расчета М. В. Потапова, Н. А. Ржаницина, В. А. Туркса, графо-аналитические способы М. В. Потапова, Я. Д. Гильденблата и В. Г. Андреянова. Рассмотрение совмещенных на одном чертеже расчетных гидрографов половодья (паводка) и сбросных расходов показывает, что максимальный расход сброса находится в точке пересечения гидрографов притока и сброса, то есть при $Q = q$

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} = 0, \quad \frac{\Delta q}{\Delta t} = 0, \quad \text{так как } \omega \frac{\Delta h}{\Delta t} = 0, \quad \text{но } \omega \neq 0.$$

С увеличением расхода притока Q_n уровень в водохранилище повышается медленно. Замедление тем больше, чем больше площадь водной поверхности водохранилища. Поэтому увеличение сбросных расходов запаздывает по сравнению с расходами притока, а в водохранилище происходит аккумуляция воды. Расходы сброса во времени сдвинуты по отношению к расходам притока (стока).

В зависимости от водного режима рек для трансформации половодья и паводка можно использовать полезную емкость водохранилища полностью или частично или запроектировать специальную емкость, размещаемую выше отметки НПУ (емкость форсировки).

При устойчивом внутригодовом распределении стока регулирование высокого стока проводят также и за счет использования полезной емкости, которая к началу половодья или паводка обычно полностью или частично срабатывается. Только срезка максимальных расходов исключительно высоких половодий выполняется за счет емкости форсировки, назначенной из условия затопления.

При ливневом характере паводочного стока в целях борьбы с наводнениями для регулирования высокого стока использование полезной емкости затруднено, и противопаводочная емкость совпадает с емкостью форсировки.

Назначение наиболее оптимальной отметки уровня форсировки при заданных параметрах стока и типа водосбросных сооружений или нахождение величины сбросного расхода решается путем технико-экономических сопоставлений различных вариантов. Кроме балансовых таблично-цифровых расчетов трансформации половодья применяют

упрощенные методы. Наиболее широко при массовом водохозяйственном проектировании для расчета сбросных сооружений используют упрощенный метод Д. И. Кочерина.

§ 2. Упрощенные методы расчетов трансформации паводков

По Д. И. Кочерину, при любой схематизации гидрографа половодья (паводка) допускается, что нарастание сбросных расходов через водослив происходит линейно. При этом условии отпадает необходимость строить гидрограф сброса по интервалам и достаточно задаваться лишь конечной величиной его расхода.

Основные допущения, принимаемые при расчете по методу Д. И. Кочерина, следующие: расчет применим к одиночному глухому водосливу без затворов; отметка гребня водослива совпадает с НПУ; перед половодьем водохранилище не опорожняется, оно наполнено до НПУ. Возможность пропуска паводка через водозаборные отверстия, турбинные камеры, судоходные шлюзы или другие имеющиеся сооружения не предусматривается.

Емкости вычисляют по статической характеристике водохранилища. Потерю воды на фильтрацию, испарение и полезную отдачу не учитывают ввиду незначительной их величины по сравнению с объемом половодья (паводка).

Основное допущение, что нарастание сбросных расходов (через водослив) происходит по линейному закону, связано с ошибками. Однако они не превышают 5—10%, то есть находятся в пределах точности гидрометрических измерений.

Формула Д. И. Кочерина справедлива и для трубчатого водоспуска.

Для водосбросных донных отверстий допущение о линейном нарастании сбросных расходов не оправдано, так как увеличение напоров в начале значительно, а в конце мало сказывается на величине сбросных расходов.

Расчет пропуска паводка через водослив выполняют двумя приемами.

Имеется гидрограф половодья (паводка) и основные его элементы. На спаде гидрографа задаются произвольной точкой, ординату которой принимают за величину максимального расхода сброса $q_{\max}$. Соединяют эту точку с нулем, получают автоматически гидрограф сбросных расходов.

Емкости форсировки находят как разности объемов притекающей в водохранилище за расчетный период воды и объемов, сбрасываемых из водохранилища при заданных расходах.

Если отметки гребня водослива и НПУ совпадают, то по топографической или объемной характеристике находят напоры на водосливе (высота форсировки) и вычисляют ширину водослива по формуле гидравлики. Проводят технико-экономическое сопоставление вариантов расчета и окончательно назначают расход сброса.

Решение задачи второго типа (по Д. М. Кочерину) при том же гидрографе половодья проводят в следующей последовательности. Опре-

деляют отметку уровня форсировки и величины сбросных расходов при заданной ширине водослива и различных значениях высоты слоя форсировки. При этом для каждой высоты слоя форсировки находят емкость форсировки по объемной характеристике. Повторяют расчет при заданных величинах слоя форсировки по формуле водослива.

На чертеже строят совмещенные кривые сбросных расходов, вычисленных по формулам гидравлики и Д. И. Кочерина. Точки пересечения кривых дают искомые результаты для разной ширины водослива. Проводят технико-экономическое сравнение полученных результатов и выбирают оптимальный.

Если гидрограф притока схематизирован по треугольнику (рис. 87, б), емкость форсировки по Д. И. Кочерину находят как

$$V_{\phi} = W_{\pi} \left(1 - \frac{q_{\max}}{Q_{\max}} \right). \quad (100)$$

Максимальный расход сброса выражается формулой:

$$q_{\max} = Q_{\max} \left(1 - \frac{V_{\phi}}{W_{\pi}} \right), \quad (101)$$

где $Q_{\max}$ — максимальный расход половодья (паводка) и сброса;
 W_{π} — объем расчетного половодья (паводка) по треугольнику;

$$W_{\pi} = \frac{1}{2} Q_{\max} T;$$

T — период половодья (паводка);

V_{ϕ} — емкость форсировки (объем водохранилища выше отметки НПУ).

Формула Д. И. Кочерина применима в пределах $V_{\phi} \leq W_{\pi}$ и $q_{\max} \leq Q_{\max}$. При схематизации гидрографа половодья (паводка) во входном створе водохранилища по трапеции (рис. 87). По Д. И. Кочерину, емкость форсировки:

$$V_{\phi} = W_{\pi} - V_{\text{сбр}} = \frac{Q_{\max}}{2} (T + t_2) - \frac{q_{\max}}{2} T = W_{\pi} \left[1 - \frac{q_{\max}}{Q_{\max}} \frac{T}{(T + t_2)} \right], \quad (102)$$

где

$$W_{\pi} = \frac{Q_{\max}}{2} (T + t_2).$$

Вводя обозначение $\eta = \frac{T}{T + t_2}$, получают формулу в виде:

$$V_{\phi} = W_{\pi} \left(1 - \eta \frac{q_{\max}}{Q_{\max}} \right). \quad (103)$$

Как и при треугольной форме гидрографа, $q_{\max}$ не может быть больше $Q_{\max}$. Формула применима к любой форме гидрографа: при треугольной форме $t_2 = 0$ и $\eta = 1$; при прямоугольной форме гидрографа $t_2 = T$ и $\eta = 0,5$.

Трапецидальная форма гидрографа занимает промежуточное положение: $1 > \eta > 0,5$. Максимальный сбросной расход соответственно

составляет:

$$q_{\max} = \frac{Q_{\max}}{\eta} \left(1 - \frac{V_{\phi}}{W_{\Pi}} \right). \quad (104)$$

Форма гидрографа половодья оказывает существенное влияние на величину емкости форсировки, наиболее опасным является гидрограф прямоугольного типа; однако такой вид гидрографа в практике обычно не встречается.

Положение вершины треугольного гидрографа оказывает некоторое влияние на величину максимального сбросного расхода. По исследованиям Л. Г. Рабухина, в среднем значение $q_{\max}$ при $\frac{t_1}{T} = \frac{1}{4}$ на 2% меньше, а при $\frac{t_1}{T} = \frac{3}{4}$ больше, чем при равнобедренном треугольном гидрографе, при $\frac{t_1}{T} = \frac{1}{2}$. Здесь t_1 — продолжительность подъема половодья (паводка); T — общая его продолжительность.

Рядом авторов внесены видоизменения формулы Д. И. Кочерина. А. В. Огиевский предлагает формулу в виде:

$$V_{\phi} = W_{\Pi} \left[1 - \frac{q_{\max}}{(1 + \alpha) Q_{\max}} \right] \quad (105)$$

и

$$q_{\max} = (1 + \alpha) Q_{\max} \left(1 - \frac{V_{\phi}}{W_{\Pi}} \right), \quad (106)$$

где $\alpha = \frac{t_2}{T}$.

При схематизации входного гидрографа половодья (паводка в виде двух сходящихся парабол с вогнутыми к оси абсцисс ветвями и острой вершиной) Д. Л. Соколовский определяет емкость форсировки по зависимости:

$$V_{\phi} = W_{\Pi} \left(1 - \frac{q_{\max}}{K Q_{\max}} \right), \quad (107)$$

где K — коэффициент, связанный с показателем степени парабол при подъеме и спаде притока, а также со сбросными расходами, в среднем равен 0,85. По исследованиям В. Н. Цингера, этот коэффициент изменяется в широких пределах.

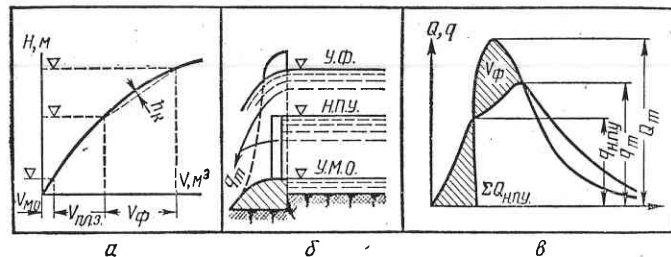


Рис. 88. Водослив с затворами на гребне (б):
а — кривые объемов; в — графики притока и сброса.

Сбросной расход, по Д. Л. Соколовскому, равен:

$$q_{\max} = K Q_{\max} \left(1 - \frac{V_{\phi}}{W_{\Pi}} \right). \quad (108)$$

На основе дальнейшего развития способа Д. И. Кочерина разработаны схемы расчетов сбросных расходов для условий, выходящих за пределы основной расчетной задачи.

При частично сработанном ниже НПУ полезном объеме водохранилища А. В. Огиевский предлагает вычислять сбросные расходы по зависимости для треугольника:

$$q_{\max} = Q_{\max} \left(1 - \frac{V_{\phi}}{W_{\Pi} - V_d} \right) (1 + \alpha), \quad (109)$$

где V_d — дополнительный объем, необходимый для заполнения водохранилища до отметки нормально подпорного уровня, или сработанный объем.

При сработке водохранилища до мертвого объема $V_d = V_{\text{плз}}$. Для уменьшения емкости форсировки при сбросе расходов применяют установку затворов (щитов) на гребне водослива или пропуск расходов через сифонные и донные водовыпуски. Наличие затворов на гребне водослива позволяет снижать емкость форсировки. Размеры этого снижения зависят от положения отметки порога водослива и его параметров.

Для вычисления сбросных расходов при глухом водосливе с затворами (верхняя грань пролетных строений находится на отметке НПУ (рис. 88), а порог водослива — на отметке УМО при наполненном водохранилище) применяют следующие расчетные построения. Сначала затворы открывают постепенно с тем, чтобы все время поддерживалась отметка НПУ. Емкость форсировки, находящаяся выше НПУ, вступает в действие, когда $Q_{\max} = Q_{\text{нпу}}$, то есть после частичного пропуска паводка.

Для треугольного графика притока при донном отверстии М. В. Потапов предложил график сбросных расходов схематизировать в виде наклонной прямой от начала паводка до максимальной ординаты, а затем в виде горизонтальной прямой до пересечения с линией спада (рис. 89).

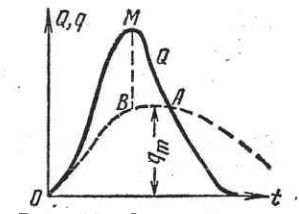


Рис. 89. Схема приближенного расчета донного водоспуска.

§ 3. Приближенный расчет регулирующего влияния вышерасположенных водохранилищ

Регулирующее влияние системы водохранилищ находится специальными расчетами, при которых определяют добегание воды, боковую приточность и регулируемую емкость естественных русл.

Общие положения о необходимости учета влияния вышележащих водохранилищ на трансформацию паводка изложены в нормах проектирования (СНиП II-И 7—65).

При расчетах имеет значение учет местоположения водохранилища по отношению к створу сооружений и их возможная связь, расположение водохранилищ по отношению друг к другу (каскадное, веерное), схематизация гидрографов притока, типы сбросных сооружений.

Разрушение одного водохранилища каскада может вызвать цепную реакцию разрушений на нижерасположенных водоемах.

Способ суммирования объемов форсировки А. В. Огиевского, рекомендуемый к расчету трансформации половодья для системы водохранилищ, имеет вид:

$$r_c = 1 - \frac{\sum V_{\Phi}}{W_n}, \quad r_i = \frac{q_{\max}}{Q_{\max}} \quad (110)$$

По способу умножения коэффициентов трансформации расчет ведут по зависимости:

$$r_c = r_1 r_2 \dots r_n \quad (111)$$

где r_i — коэффициент, равный отношению $\frac{q_{\max}}{Q_{\max}}$ i водохранилища. Оба эти способа приближенные.

В. И. Мокляк предложил определять коэффициент стока при одном водохранилище, расположенном выше расчетного створа по формуле:

$$r_c = 1 - \frac{V_{\Phi}}{W_n} \gamma, \quad (112)$$

где γ — параметр, отражающий возрастание регулирующего влияния водохранилища по мере его приближения к расчетному створу, равный $1 - \left(1 - \frac{f_n}{F}\right)^n$; $n=0,75$ для весенних половодий и $n=0,5$ для ливневых паводков.

При расположении каскада из нескольких водохранилищ у замыкающего створа и большого числа прудов в бассейне И. А. Железняк рекомендует определять регулирующее влияние по зависимости:

$$r_0 = \left(1 - \frac{\sum V_{\Phi}}{W_n}\right) r_1 r_2 r_3 \dots \quad (113)$$

В расчетах учитывается, что при большом бассейне реки сток формируется не со всей площади, а с ее части. Водохранилище, расположенное за пределами площади формирования стока, на величину расходов не влияет. В зависимости от местоположения водохранилища изменяется его влияние на сбросные расходы.

Если водохранилище с большой емкостью форсировки располагается на основной реке в нижней части водосбора и выше проектируемого, то оно может вызвать увеличение расходов сброса в створе проектируемого водохранилища. В этом случае сбросные расходы с вышерасположенного водохранилища могут наложиться на основную волну паводка с незарегулированной части водосбора.

Как проектирование, так и строительство водохранилищ целесообразно начинать сверху вниз. Водосбросные сооружения нижерасположенных водохранилищ в этих случаях рассчитывают на пропуск сбросных расходов вышерасположенных водохранилищ.

Глава IX. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

§ 1. Задачи службы эксплуатации

Оперативное управление водными ресурсами водохранилищ для плановой отдачи, режима уровней верхнего и нижнего бьефов, пропуска половодий и паводков через водохранилище с учетом безопасной работы сооружений гидроузла на основе данных гидрологического прогноза составляет основное содержание технической эксплуатации водохранилищ.

На условия эксплуатации большое влияние оказывают наносы, ветер, испарение, ледовый режим, водная растительность, геология, топография, а также требования, которые предъявляют к режиму водохранилищ водопотребители и водопользователи.

Размещение водохранилищ на реке (одиночное, веерное, каскадное), вид регулирования стока (суточное, недельное, сезонно-годовое, многолетнее), целевое назначение (обслуживание одной отрасли или комплекса отраслей водного хозяйства), режим отдачи (постоянная гарантированная или переменная, изменяющаяся в зависимости от водности года или начального наполнения) обуславливают различие в эксплуатации отдельных водохранилищ.

Для водохранилищ комплексного назначения, обслуживающих ряд отраслей водного хозяйства (орошение, водоснабжение, обводнение, рыборазведение, речной транспорт, тепло- и гидроэнергетика) или имеющих общереспубликанское и союзное значение, в период проектирования разрабатывают основные правила использования водных ресурсов водохранилища.

Порядок согласований с заинтересованными организациями и государственным санитарным надзором, а также утверждение основных правил использования водных ресурсов устанавливают на основании постановления Совета Министров СССР Министерства водного хозяйства и мелиорации. Основные положения правил использования водных ресурсов разрабатываются для вновь строящихся водохранилищ объемом более 10 млн. м³ при НПУ и меньшего размера при комплексном использовании стока к моменту сдачи их в постоянную эксплуатацию. В период первоначального заполнения водой водохранилища пользуются правилами временной эксплуатации.

Изолированные водохранилища объемом менее 10 млн. м³, обслуживающие одну отрасль водного хозяйства, а также мелкие озера, пруды и копани, находящиеся в ведении колхозов и совхозов, эксплуатируют на основе технических инструкций и указаний согласно проекту и плану водопользования.

Основные задачи органов технической эксплуатации изучают в специальных курсах эксплуатации гидромелиоративных систем, гидроэлектростанций, судоходных сооружений водоснабжения (И. А. Шаров, Л. С. Кусков, Я. Н. Флексер).

Основные правила использования водных ресурсов водохранилища включают следующие вопросы: назначение; характеристика притока воды; основные параметры и морфометрические и гидравлические характеристики водохранилища; гидравлические характеристики сооружений и оборудования гидроузла; расчетные данные о величине планируемой отдачи и проектные показатели использования водных ресурсов; порядок использования водных ресурсов водохранилища и гидрологических прогнозов; пропуск высоких вод; борьба с наносами; гидрометрическое обслуживание; информация и оповещения о водном режиме.

К общим задачам эксплуатации водохранилища относятся: составление и выполнение ежегодных оперативных планов эксплуатации; организация надзора и ухода за водохранилищами и сооружениями; наблюдение за переработкой берегов, заилением, ледовыми явлениями в водохранилище и в нижнем бьефе; пропуск льда и плавающих тел через водосбросные сооружения, текущий ремонт, проведение противопаводочных мероприятий; измерение основных элементов водного баланса и производство промеров; уменьшение потерь воды из водохранилища.

При составлении планов эксплуатации широко используют гидрологические прогнозы, по которым вычисляют вероятные сроки и величины притока воды в водохранилище. Для различных видов регулирования стока заблаговременность прогноза и его детализация по отрезкам времени, а также достоверность изменяются в широких пределах.

При суточном регулировании прогнозируется приток воды по часам, при сезонно-годовом требуется прогноз предстоящей водности межени для обеспечения отдачи. В маловодные годы решающее значение имеет заполнение емкости в период половодья, для чего необходим прогноз его объема.

В многоводные годы в период эксплуатации наибольшие затруднения возникают при пропуске максимальных расходов через водосбросные сооружения. Прогноз максимальных расходов в этих условиях дает возможность заранее наметить порядок проведения холостых сбросов и сработок емкости водохранилища.

При эксплуатации водохранилищ проводят как гидрологические расчеты, так и расчеты регулирования стока. При составлении ежегодных оперативных планов для различных отрезков времени необходимо оценить текущую гидрометеорологическую обстановку и сделать на ее основе прогноз стока для условий весеннего половодья, летне-осенней межени; установить вероятность наступления дождевых паводков с тем, чтобы внести необходимые поправки в проектные проработки.

При эксплуатационных расчетах регулирования стока на основе используемых данных прошлых наблюдений известны все исходные условия и варианты регулирования, размеры орошаемой площади или

мощность электростанции, параметры водохранилища и обеспеченность отдачи. Требуется определить результаты регулирования. Эти расчеты проводят при эксплуатации в целях: предварительной оценки правил регулирования, сопоставления выявленных вариантов, исследования выбранного варианта правил регулирования.

Для рационального использования водохранилищ в период эксплуатации А. Д. Саваренский рекомендует применять регулирование методом вероятных вариантов следующим образом.

Заблаговременно задаться основными вариантами возможной водохозяйственной обстановки эксплуатации водохранилища на различные характерные даты внутри года. Варианты водохозяйственной обстановки включают возможные начальные наполнения водохранилища на эту дату и различную водность предстоящего периода. При этом за начальные наполнения принимают лишь средние из нескольких интервалов, на которые разбита вся емкость водохранилища, а водность задают в виде стока разной обеспеченности (например, 1, 3, 10, 25, 50, 75, 90, 97, 99% обеспеченности).

Для каждого сочетания возможного начального наполнения и предстоящего стока балансовым таблично-цифровым способом выявляют водохозяйственные последствия (водоотдачи, энергоотдачи, наполнения, сбросы) в период до следующей характерной даты года.

На графике откладывают координаты: по оси абсцисс — обеспеченность, а по оси ординат — водоотдачу, энергоотдачу, наполнение, сбросы. На полученных точках графика отмечают начальные наполнения, которым они соответствуют. Проведенные через точки условные кривые обеспеченности ожидаемых результатов регулирования А. Д. Саваренский называет «прогнозными» кривыми водоотдач, наполнений, сбросов (рис. 90).

Наличие прогнозных кривых помогает своевременно принимать нужные меры и правильно ориентироваться в выборе правил регулирования в период эксплуатации. Головное и другие сооружения и магистральные каналы рассчитывают на определенную пропускную способность. Во время забора воды в водохранилище поддерживают необходимые уровни, колебания которых согласовывают с отметками порогов водозаборных сооружений, проверяя их пропускную способность и ее соответствие с планом забора воды, а также с условиями командования этих уровней над орошаемой площадью.

При машинном водоподъеме включение и выключение насосной станции в зависимости от условий наполнения водохранилища координируются особыми правилами. Ежегодно устанавливают фактический срок открытия каналов и срок первой подачи воды в хозяйства.

Операции по забору воды в соответствии с утвержденным в процессе эксплуатации планом проводит дежурный диспетчер, который отвечает за выполнение хозяйственного плана. В условиях комплексного использования водных ресурсов управление водных режимов обеспечивается строгим применением правил диспетчерского регулирования.

Правила диспетчерского регулирования разрабатывают при составлении проекта и уточняют при изменении условий работы водохрани-

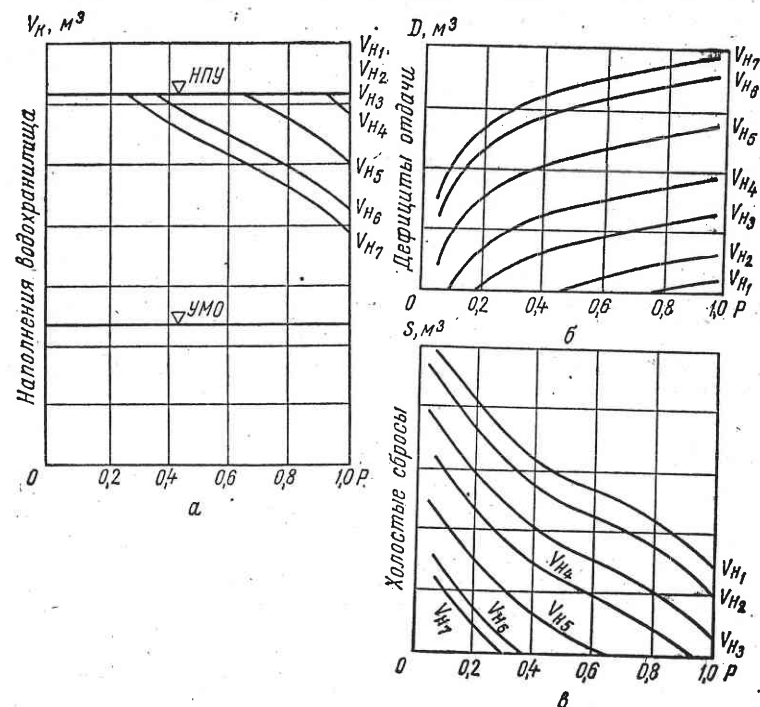


Рис. 90. Прогнозные кривые обеспеченности:
 а — конечных наполнений; б — дефицитов водоотдачи; в — холодных сбросов.

лица или состава водопотребителей и водопользователей, а также по мере накопления эксплуатационного опыта. Диспетчерские правила входят в «основные положения правил использования водных ресурсов водохранилища», изменение которых производят только с разрешения Министерства водного хозяйства и мелиорации.

Характеристиками плана водохозяйственного использования водохранилища на текущий и предстоящий периоды времени являются величины:

- гарантированной отдачи на водоснабжение и орошение;
- судоходных, санитарных и иных попусков среднесуточных и минимальных в пределах суток;
- забора воды на выработку электроэнергии.

Выполнение плана зависит от наличия запаса воды в водохранилище на протяжении года, размеров текущего притока или достоверного гидрологического прогноза, ожидаемого в предстоящий период, и нужд народного хозяйства. Ограничения, налагаемые на работу отдельных сооружений, исходят из требований безопасности и сохранности сооружений, борьбы с заилением водохранилища.

Применительно к отдельным водохранилищам устанавливают ограничения расходов воды, сбрасываемых через сооружение в нижний

бьеф в зависимости от различных условий; ограничения амплитуды суточного и недельного регулирования на ГЭС по условиям судоходства, орошения, рыбного хозяйства; ограничения глубины или интенсивности сработки водохранилища по санитарным, судоходным, рыбохозяйственным и прочим условиям.

В положении о порядке использования водных ресурсов водохранилищ РСФСР указывается, что правила диспетчерского регулирования должны предусматривать «Ограничение или прекращение водоотдачи при наступлении условий, выходящих за границы принятой для данного потребления или группы потребителей расчетной надежности водообеспечения». Отступления от утвержденных правил диспетчерского регулирования допускаются при условии соответствующих согласований и разрешений по существующему положению. Расходование относительных избытков и распределение водоотдачи в условиях относительного дефицита между отраслями водного хозяйства предусматривается правилами диспетчерского регулирования.

При составлении планов комплексного использования водных ресурсов используются ЭВМ для того, чтобы осуществить оптимизацию в эксплуатационных расчетах и проектных проработках.

При гидроэнергетике, входящей в комплекс, требования на воду связаны с наполнениями водохранилища и уровнями нижнего бьефа. Выдерживается режим санитарных попусков, а также расходов воды, сбрасываемых в нижний бьеф для обеспечения бесперебойной работы промышленных и коммунальных водозаборов, расположенных ниже по реке. Отдельные особенности в работе водохранилища накладывает судоходство, недельное и суточное регулирование. Подробно разработанные правила диспетчерского регулирования позволяют управлять работой водохранилища наиболее технически грамотно и экономически выгодно.

§ 2. Диспетчерские графики

Диспетчерские графики составляют в тех случаях, когда сверх постоянной гарантированной отдачи потребитель может с пользой освоить излишки воды, образующиеся в различные периоды и годы.

Составление диспетчерских графиков позволяет: удовлетворить гарантированную отдачу, снизить или прекратить холодные сбросы, обеспечить безаварийную работу сооружений. Создаются условия более эффективного использования полезной емкости водохранилища не только для поддержания гарантированной отдачи, но и для регулирования высокого стока.

Сезонная неравномерность годового стока для рек с половодьем в весенний или летний периоды позволяет совместить функции регулирования высокого и низкого стоков в одной полезной емкости. При устойчивом внутригодовом распределении стока к началу половодья емкость срабатывается и свободная ее часть предназначается для регулирования высокого стока. Одной и той же емкостью удастся обеспечить гарантированную отдачу и увеличить общее использование воды

за счет дополнительной отдачи, вызванной наличием избыточного стока.

При ливневом характере речного стока и непостоянных сроках прохождения паводков, совмещение функций регулирования низкого и высокого стоков одной емкостью невозможно. В этом случае полезная емкость выполняет только функцию регулирования низкого стока. Емкость для регулирования стока половодья назначается отдельно от полезной. Использовать дополнительную воду сверх гарантированной проектной отдачи можно лишь в ограниченных пределах.

Повышение отдачи из водохранилища в многоводные периоды свыше гарантированной позволяет увеличить площадь орошения при наличии подготовленной сети каналов или трубопроводов на данной площади.

Для управления работой водохранилища при переменной отдаче строят контрольные диспетчерские графики для эксплуатации водохранилища.

Диспетчерский график — один из основных руководящих документов эксплуатационной службы. По графикам подается вода в отдельные сезоны года при различных условиях водности: повышенной, средней и низкой.

Диспетчерский график строят в координатах: ось абсцисс — время, ось ординат — объемы наполнений или высота (отметки). При комплексном использовании стока диспетчерский график дополняют специальными указаниями. При низких степенях регулирования стока, когда наполнение водохранилища обеспечено, диспетчерские графики не составляют.

Диспетчерский график состоит из серии кривых, делящих емкость водохранилища на отдельные зоны. Линиями диспетчерского графика емкость водохранилища подразделяется на четыре основные зоны: полной избыточной отдачи q_b , избыточной отдачи в диапазоне $q_b > q > q_r$, гарантированной отдачи q_r , перебойной (урезанной) отдачи $q < q_r$. Ограничивающие эти зоны линии называют противоаварийными, противосбросными, противоперебойными.

Каждая линия состоит из двух ветвей (накопления и сброски). При сезонном годичном регулировании стока ежегодно сбрасывается вся полезная емкость до отметки уровня мертвого объема. При многолетнем регулировании стока ежегодно сбрасывается только часть полезной емкости до отметки ежегодного предпаводочного уровня.

Противоперебойные линии отделяют зону гарантированной отдачи от зон урезанной и избыточной отдачи. Ветвь накопления очерчивает верхние границы объема возможной аккумуляции стока в период половодья. Рассчитывают противоперебойные линии по стоку лет заданной обеспеченности. По ветви сброски уточняют режим сброски в межень. Формы диспетчерских графиков для сезонного регулирования и положение на них противоперебойной и противосбросной линий определяются глубиной сезонного регулирования стока, характером внутригодового распределения стока, соотношением между гарантированной и избыточной отдачами.

При построении диспетчерского графика учитывают сроки наступления паводка раннего и позднего паводка (половодья); степень сосредоточенности половодья (растянутое, дружное).

Принципы построения и расчета диспетчерских графиков разработаны С. Н. Крицким и М. Ф. Менкелем, П. А. Ляпичевым, В. А. Бахтиаровым. Методика построения диспетчерских графиков по С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю следующая.

Верхнюю огибающую ветвей накопления и сброски водохранилища принимают за противоперебойную линию диспетчерского графика. При гарантированной отдаче, если полезная емкость водохранилища заполняется предельно низким половодьем, ее можно ежегодно сбрасывать полностью. При наличии сбросов нет необходимости начинать заполнение с начала половодья. Перебой в отдаче может явиться следствием двух причин: недонаполнения водохранилища и низкого последующего стока по отношению к расчетным величинам. Потребность в сохранении переходящих из года в год запасов воды возникает в том случае, когда при гарантированной отдаче опорожненное водохранилище не заполняется доверху одним маловодным половодьем и ежегодное опорожнение нежелательно.

При возникновении угрозы преждевременной сброски водохранилища гарантированная отдача снижается на 20%. Если создается опасность не выдержать и сокращенную на 20% отдачу, то ее уменьшают еще на 20%.

Переход к ограниченной отдаче назначается тогда, когда при стоке расчетной обеспеченности запас в водохранилище оказывается недостаточным для бесперебойной работы до начала следующего половодья.

Границы области ограниченной отдачи строят в виде двух линий. Первая из них определяет необходимость перехода к расходу воды, равному 80% гарантированной отдачи. Зона ограниченной отдачи, равной 80% гарантированной, появляется после того как в течение предыдущего периода выявится тенденция к маловодности года, а зона последующей ограниченной отдачи — после того как выяснится отсутствие в текущем году осенних паводков.

Построение ветви накопления противосбросной линии проводят по стоку многоводного половодья. Очертание противосбросной линии соответствует нижней огибающей накоплений водохранилища. В зависимости от соотношений между емкостью водохранилища и многоводностью половодья возможны два варианта очертания противосбросной линии. При полной отдаче и опорожненном вначале водохранилище удастся избежать холостых сбросов в многоводное половодье.

Ветвь накопления противосбросной линии представляет собой ход заполнения водохранилища в многоводное половодье и отвечает условию, что при работе с полной отдачей водохранилище оказывается заполненным в конце половодья.

Ветвь сброски отвечает опорожнению в наиболее многоводную межень при работе с полной отдачей. Совмещение противоперебойной и противосбросной линий диспетчерского графика не всегда возможно. Если при сезонно-годовом регулировании стока зоны гарантирован-

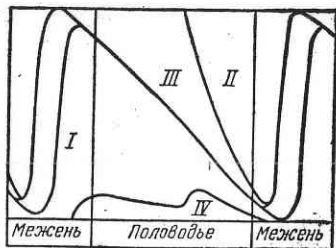


Рис. 91. Общий вид диспетчерского графика:

I — зона гарантийной отдачи; II — зона полной избыточной отдачи; III — зона избыточной отдачи; IV — зона урезанной отдачи.

тогда обе задачи регулирования выполнимы. Если противоперебойная линия диспетчерского графика располагается выше противоперебойной, то получается противоречие между регулированием низкого и высокого стоков, которое всегда решается в пользу предотвращения перебоев.

Для построения противоаварийной линии диспетчерского графика максимальные расходы берут во входном створе водохранилища, при расчете используют объемную характеристику водохранилища и кривые связи между уровнями и сбросными расходами. Проводят расчет трансформации половодья при различных длинах водосливного фронта, задают условия для пропуска высокого стока половодья, гарантирующие сохранность сооружений и обеспечение гарантированной отдачи.

При расчете применяются таблично-цифровые балансовые или графоаналитические способы решения уравнения водного баланса. Из условий экономики выбирают ширину водосливного фронта таким образом, чтобы линия накопления противоаварийной линии диспетчерского графика касалась противоперебойной линии в нижней части, а форсировка уровней не превышала заданную величину.

На рисунке 91 приведен общий вид диспетчерского графика с различными линиями и зонами отдачи. В каждый момент времени запас воды в водохранилище может быть найден по объемной характеристике, а расход отдачи — по соответствующей линии диспетчерского графика.

П. А. Ляпичевым разработана методика построения диспетчерских (контрольных) графиков на максимальную и переменную отдачи при сезонном регулировании стока.

§ 3. Наблюдения за состоянием водохранилища

Правильная эксплуатация во многом зависит от хорошо поставленных наблюдений по учету притока и расходования воды. Накопление данных о водных ресурсах в период строительства и эксплуатации позволяет уточнить проектные показатели.

ной и полной избыточной отдачи не пересекаются, то задачи регулирования высокого и низкого стоков решаются одновременно.

При многолетнем регулировании стока ежегодная диспетчерская сработка составляет только часть полной емкости водохранилища. Нижняя зона не срабатывается и сохраняется как переходящий запас на случай наступления ряда маловодных лет.

Возможно, что противоперебойная линия проходит на всем протяжении выше противоперебойной, зоны гарантированной и полной отдачи не пересекаются,

Учет притока и расходования воды из водохранилища проводит эксплуатационный персонал на основе действующих наставлений и указаний Гидрометеослужбы при Совете Министров СССР.

Наблюдениями устанавливается баланс притока и расхода воды из водохранилища на каждый период времени.

С гидрометрическими сооружениями в верхнем бьефе увязывают характеристики водохранилища. Количество постов и станций для гидрометрического и гидрометеорологического обслуживания назначают при разработке проекта водохранилища и уточняют при эксплуатации. Размещение информационных водомерных постов зависит от очертания и размеров водохранилища. Желательно иметь для всех водомерных постов единую отметку нуля графика.

К основным гидрометрическим сооружениям относятся: гидрометрическая станция во входном створе водохранилища, оборудованная самописцами, и водомерные посты на боковых притоках.

Сведения о наличном объеме за каждый период времени определяют по среднему уровню водохранилища. На водохранилищах большой протяженности устанавливают несколько водомерных постов, дающих возможность измерить продольные профили водохранилища. Один водомерный пост предназначен для измерения уровней и расходов нижнего бьефа.

Учет расходования воды из водохранилища осуществляется при помощи тарированных сооружений или установленных на них водомеров.

Гидрологические и метеорологические наблюдения на крупных водохранилищах производят органы Гидрометеослужбы.

На малых водохранилищах, эксплуатируемых в интересах только одной хозяйственной организации, обобщение всех материалов по водохранилищу ведут органы эксплуатации.

Для сбора и передачи сведений и оповещений водохранилище оборудуют линиями связи. Пункт управления имеет двухстороннюю связь с основными водопотребителями. На крупных водохранилищах организована система оповещения организаций и ведомств о работе водохранилища и о предстоящих изменениях в отдельные периоды.

Порядок пропуска паводков и паводков на крупных водохранилищах, а также изменения в режиме их работы, связанные с понижением или подъемом уровней воды, затрагивают интересы населения и производства в районах береговой полосы водохранилищ и на реке ниже гидроузла. Если возникают непредвиденные обстоятельства, угрожающие безопасности и сохранности основных сооружений, изменению режима в работе гидроузла против предусмотренного планом, лица, ответственные за эксплуатацию, оповещают и предупреждают государственные организации (о пропуске паводков и необходимости проведения мероприятия по охране населения). О предстоящих сбросах, если они близки к предельным, заблаговременно ставят в известность государственные органы районов, расположенных ниже водохранилища.

Органы эксплуатации проводят воднобалансовые наблюдения. Приходная часть баланса включает осадки, поверхностный и подземный притоки воды в водохранилища. Расходная часть состоит из забора

воды на производственные нужды, фильтрацию, испарение, подземный отток и сбросные расходы.

Учет фильтрации необходим и для обеспечения сохранности сооружений, плотин и дамб обвалования. В состав наблюдений включают измерения пьезометрических уровней в различных местах сооружений. В местах выхода фильтрационных вод устанавливают водосливы. Систематически проводят наблюдения за ходом заилиenia водохранилища. В целях борьбы с заилиением паводки пропускают при пониженном уровне водохранилища, а промывку наносов ведут путем пропуска сосредоточенных расходов через донные отверстия.

По мере заилиenia кривая подпора перемещается по течению и объемная характеристика водохранилища перестраивается.

Ежегодно после прохождения половодья или в установленные сроки уточняют кривые площадей и объемов, которые изменяются из-за переработки берегов, оползней, заилиenia и отмирания водной растительности. Обычно площадь увеличивается, а средняя глубина водохранилища уменьшается.

Зимой служба эксплуатации принимает меры по предохранению частей сооружений от воздействия льда при его вертикальном и горизонтальном смещениях, по ускорению образования ледостава, по борьбе с обмерзанием решеток.

Для поддержания качества воды осуществляются санитарные мероприятия. На каждом водохранилище в створах, установленных органами санитарного надзора, ведутся регулярные наблюдения и лабораторные исследования качества воды, которые выполняют органы эксплуатации. Общий контроль за санитарным состоянием водохранилища осуществляет Государственный санитарный надзор.

На крупных водохранилищах проводятся научные исследования ветрового волнения и колебаний уровней, изучаются сейши, фиксируются неблагоприятные последствия создания водохранилища на природный режим окружающей территории.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Отклонения ординат кривой обеспеченности от середины при $x_{cp} = 1$, $C_0 = 1$

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

Ординаты кривых трехпараметрического гамма-распределения при $C_S = 2 C_D$

p, %	Ординаты κ_p кривой гамма-распределения при коэффициенте изменчивости C_D														
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
0,01	1,42	1,92	2,50	3,20	3,98	4,85	5,81	6,85	7,98	9,21	10,5	11,80	13,20	14,70	16,40
0,03	1,38	1,83	2,36	1,96	3,64	4,89	5,22	6,11	7,08	8,11	9,20	10,80	11,60	12,90	14,80
0,05	1,86	1,79	2,29	2,85	3,48	4,18	4,95	5,77	6,66	7,60	8,61	9,65	10,80	11,90	13,10
0,1	1,34	1,73	2,19	2,70	3,27	3,87	4,56	5,30	6,08	6,91	7,75	8,65	9,60	10,60	11,60
0,3	1,30	1,64	2,02	2,45	2,91	3,42	3,96	4,55	5,16	5,81	6,47	7,10	7,98	8,70	9,50
0,5	1,28	1,59	1,94	2,82	2,74	3,20	3,68	4,19	4,74	5,80	5,90	6,50	7,13	7,80	8,42
1	1,25	1,52	1,82	2,16	2,51	2,89	3,29	3,71	4,15	4,60	5,05	5,53	6,02	6,55	7,08
3	1,20	1,41	1,64	1,87	2,13	2,39	2,66	2,94	3,21	3,51	3,80	4,12	4,42	4,71	4,98
5	1,17	1,35	1,54	1,74	1,94	2,55	2,86	2,57	2,78	3,00	3,22	3,40	3,60	3,80	3,96
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,67	1,80	1,94	2,06	2,19	2,30	2,40	2,50	2,57	2,64	2,70
20	1,08	1,16	1,23	1,31	1,38	1,44	1,50	1,54	1,58	1,61	1,62	1,63	1,62	1,61	1,59
25	1,06	1,13	1,18	1,23	1,28	1,31	1,34	1,37	1,38	1,39	1,39	1,35	1,33	1,31	1,28
30	1,05	1,09	1,13	1,16	1,19	1,21	1,22	1,22	1,22	1,20	1,18	1,14	1,11	1,08	1,04
40	1,02	1,04	1,05	1,05	1,04	1,03	1,01	0,98	0,96	0,92	0,87	0,83	0,77	0,72	0,67
50	1,00	0,99	0,97	0,95	0,92	0,89	0,85	0,80	0,75	0,69	0,64	0,58	0,52	0,46	0,40
60	0,97	0,94	0,90	0,85	0,80	0,75	0,69	0,63	0,57	0,51	0,45	0,39	0,33	0,28	0,23
70	0,94	0,89	0,82	0,76	0,69	0,62	0,55	0,49	0,42	0,36	0,30	0,25	0,20	0,16	0,12
75	0,93	0,86	0,78	0,71	0,63	0,56	0,49	0,42	0,35	0,29	0,24	0,19	0,15	0,11	0,08
80	0,92	0,88	0,74	0,66	0,57	0,50	0,42	0,35	0,28	0,22	0,18	0,13	0,09	0,06	0,05
90	0,87	0,75	0,64	0,58	0,44	0,35	0,27	0,21	0,15	0,10	0,07	0,05	0,08	0,02	0,01
95	0,84	0,70	0,56	0,45	0,34	0,26	0,18	0,12	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00
97	0,82	0,66	0,52	0,39	0,29	0,20	0,14	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
99	0,78	0,59	0,44	0,30	0,21	0,13	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Значения коэффициента изменчивости в зависимости от значений параметра λ при $C_S = 2 C_D$ (λ — значения отрицательные)

C_D	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,50	0,0565	0,0589	0,0613	0,0638	0,0664	0,0690	0,0716	0,0743	0,0771	0,0799
0,60	0,0828	0,0858	0,0887	0,0918	0,0949	0,0981	0,101	0,105	0,108	0,111
0,70	0,115	0,118	0,122	0,126	0,129	0,133	0,137	0,141	0,145	0,149
0,80	0,153	0,157	0,162	0,166	0,170	0,175	0,180	0,184	0,189	0,194
0,90	0,198	0,203	0,208	0,213	0,218	0,224	0,229	0,234	0,240	0,245
1,00	0,251	0,256	0,262	0,268	0,274	0,280	0,286	0,292	0,298	0,304
1,10	0,311	0,317	0,323	0,330	0,350	0,337	0,343	0,350	0,364	0,371
1,20	0,378	0,386	0,393	0,400	0,408	0,415	0,423	0,431	0,458	0,446
1,30	0,454	0,462	0,471	0,479	0,487	0,496	0,504	0,513	0,521	0,530
1,40	0,539	0,548	0,557	0,566	0,575	0,584	0,594	0,603	0,613	0,623
1,50	0,632	0,642	0,652	0,662	0,672	0,682	0,692	0,703	0,713	0,724
1,60	0,734	0,745	0,756	0,767	0,778	0,789	0,800	0,811	0,823	0,834
1,70	0,846	0,857	0,869	0,881	0,893	0,905	0,917	0,929	0,941	0,953
1,80	0,966	0,978	0,991	1,004	1,016	1,029	1,042	1,055	1,069	1,082
1,90	1,095	1,109	1,122	1,136	1,150	1,163	1,177	1,191	1,205	1,220
2,00	1,234	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Соответственные значения коэффициента асимметрии C_s и коэффициента скошенности S биномиальной кривой распределения

C_s	$\frac{Q_p - Q_0}{\sigma_Q} = \Phi(P, C_s)$			$\Phi_0 - \Phi_{95}$	$S = \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{Q_5 - Q_{95}}$
	Φ_5	Φ_{50}	Φ_{95}		
0,0	1,64	0,00	-1,64	3,28	0,00
0,1	1,67	-0,02	-1,61	3,28	0,03
0,2	1,70	-0,03	-1,58	3,28	0,06
0,3	1,72	-0,05	-1,55	3,27	0,08
0,4	1,75	-0,07	-1,52	3,27	0,11
0,5	1,77	-0,08	-1,49	3,26	0,14
0,6	1,80	-0,10	-1,45	3,25	0,17
0,7	1,82	-0,12	-1,42	3,24	0,20
0,8	1,84	-0,13	-1,38	3,22	0,22
0,9	1,86	-0,15	-1,35	3,21	0,25
1,0	1,88	-0,16	-1,32	3,20	0,28
1,1	1,89	-0,18	-1,28	3,17	0,31
1,2	1,92	-0,19	-1,24	3,16	0,34
1,3	1,94	-0,21	-1,20	3,14	0,37
1,4	1,95	-0,22	-1,17	3,12	0,39
1,5	1,96	-0,24	-1,13	3,09	0,42
1,6	1,97	-0,25	-1,10	3,07	0,45
1,7	1,98	-0,27	-1,06	3,04	0,48
1,8	1,99	-0,28	-1,02	3,01	0,51
1,9	2,00	-0,29	-0,98	2,98	0,54
2,0	2,00	-0,31	-0,95	2,95	0,57
2,1	2,01	-0,32	-0,91	2,92	0,59
2,2	2,02	-0,33	-0,88	2,89	0,63
2,3	2,01	-0,34	-0,85	2,86	0,64
2,4	2,00	-0,35	-0,82	2,82	0,67
2,5	2,00	-0,36	-0,79	2,79	0,69
2,6	2,00	-0,37	-0,76	2,76	0,72
2,7	2,00	-0,38	-0,74	2,74	0,74
2,8	2,00	-0,39	-0,71	2,71	0,76
2,9	1,99	-0,39	-0,69	2,68	0,78
3,0	1,97	-0,40	-0,67	2,64	0,80
3,1	1,97	-0,40	-0,64	2,62	0,81
3,2	1,96	-0,41	-0,62	2,59	0,83
3,3	1,95	-0,41	-0,60	2,50	0,85
3,4	1,94	-0,41	-0,59	2,53	0,86
3,5	1,93	-0,41	-0,57	2,50	0,87
3,6	1,93	-0,42	-0,56	2,48	0,89
3,7	1,91	-0,42	-0,54	2,45	0,90

Продолжение

C_s	$\frac{Q_p - Q_0}{\sigma_Q} = \Phi(P, C_s)$			$\Phi_5 - \Phi_{95}$	$S = \frac{Q_5 + Q_{95} - 2Q_{50}}{Q_5 - Q_{95}}$
	Φ_5	Φ_{50}	Φ_{95}		
3,8	1,90	-0,42	-0,53	2,43	0,91
3,9	1,90	-0,41	-0,51	2,41	0,92
4,0	1,90	-0,41	-0,50	2,40	0,92
4,1	1,89	-0,41	-0,49	2,38	0,93
4,2	1,88	-0,41	-0,48	2,36	0,94
4,3	1,87	-0,40	-0,47	2,34	0,94
4,4	1,86	-0,40	-0,46	2,32	0,95
4,5	1,85	-0,40	-0,45	2,30	0,96
4,6	1,84	-0,40	-0,44	2,28	0,97
4,7	1,83	-0,40	-0,43	2,26	0,97
4,8	1,81	-0,39	-0,42	2,23	0,98
4,9	1,80	-0,39	-0,41	2,21	0,98
5,0	1,78	-0,38	-0,40	2,18	0,98
5,1	1,76	-0,38	-0,39	2,15	0,98
5,2	1,74	-0,37	-0,38	2,15	0,98

ЛИТЕРАТУРА

- Авакян А. В., Шарапов В. А. Водохранилища гидроэлектростанций СССР. Энергия, 1968.
- Алексеев Г. А. Расчеты паводочного стока рек СССР. Гидрометеиздат, 1955.
- Алтунин С. Т. Регулирование стока. Сельхозиздат, М., 1926.
- Андреев В. Г. Внутригодовое распределение стока. Гидрометеиздат, Л., 1960.
- Бахтияров В. А. Водное хозяйство и водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, 1961.
- Браславский А. П. Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. Гидрометеиздат, 1954.
- Великанов М. А. Гидрология суши. Гидрометеиздат, 1964.
- Воскресенский К. П. Гидрологические расчеты при проектировании сооружений на малых реках, ручьях и временных водотоках. Гидрометеиздат, 1956.
- Железняк И. А. Регулирование паводочного стока. Гидрометеиздат, 1965.
- Железняков Г. В. Гидрометрия. «Колос», 1965.
- Иванов К. Е. Гидрология болот. Гидрометеиздат, 1953.
- Караушев А. В. Речная гидравлика. Гидрометеиздат, 1969.
- Картвелишвили Н. А. Теория вероятностных процессов в гидрологии и регулировании речного стока. Гидрометеиздат, 1967.
- Константинов А. Р. Испарение в природе. Гидрометеиздат, 1968.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. Гидрометеиздат, 1952.
- Ляпичев П. А. Методика регулирования речного стока. Госстройиздат, 1955.
- Мокляк В. И. Расчет весенних максимальных расходов воды. Труды Киевской н-и гидрологической обсерватории УГМ УССР, вып. 3(4). Гидрометеиздат, 1953.
- Огиевский А. В. Гидрология суши. Сельхозгиз, 1951.
- Плешков Я. Ф. Регулирование речного стока. Гидрометеиздат, 1961.
- Потапов М. В. Сочинения, т. III. Сельхозгиз, 1951.
- Пышкин Б. А. Вопросы динамики берегов водохранилищ. Изд. АН УССР, 1963.
- Саваренский А. Д. Регулирование речного стока водохранилищами. АН СССР, М., 1951.
- Соколовский Д. Л. Речной сток. Гидрометеиздат, 1968.
- Указания по определению расчетных минимальных расходов воды рек при строительном проектировании СН 346—68. Гидрометеиздат, 1966.
- Чеботарев А. И. Общая гидрология. Гидрометеиздат, 1960.
- Шамов Г. И. Заиление водохранилищ. Гидрометеиздат, 1950.
- Шульц В. Л. Реки Средней Азии. Гидрометеиздат, 1965.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть I. Гидрология

Введение	3
Глава I. Статистические методы, применяемые в гидрологии	11
§ 1. Статистические характеристики ряда	12
§ 2. Понятие о вероятности	14
§ 3. Правило сигм	16
§ 4. Определение погрешностей в вычислении статистических характеристик ряда	18
§ 5. Корреляция	19
§ 6. Применение метода корреляции к определению норм стока	23
Глава II. Общие сведения о реках	25
§ 1. Река и ее система	25
§ 2. Речной бассейн	27
§ 3. Речная долина и речное русло	29
§ 4. План реки	30
§ 5. Продольный профиль реки	31
§ 6. Поперечный профиль реки	33
§ 7. Поперечный уклон реки	35
Глава III. Режим рек. Озера и болота	36
§ 1. Колебания уровней воды в реках	36
§ 2. Типы питания рек	37
§ 3. Распределение стока по сезонам. Классификация рек СССР	38
§ 4. Ледовый режим рек	40
§ 5. Водный баланс речного бассейна	44
§ 6. Классификация озер	47
§ 7. Водный баланс озер	49
§ 8. Ветровые волны, сейши	50
§ 9. Замерзание озер	52
§ 10. Болота, их образование и классификация	53
§ 11. Гидрологические особенности болот	55
Глава IV. Годовой сток и его распределение	58
§ 1. Характеристика годового стока	58
§ 2. Определение нормы стока	60
§ 3. Изменчивость годового стока	67
§ 4. Внутригодовое распределение стока	83
§ 5. Расчет внутригодового распределения стока при наличии данных гидрометрических наблюдений	86
§ 6. Построение кривой обеспеченности суточных расходов воды	90

§ 7. Расчет внутригодового распределения стока при отсутствии или недостаточности данных гидрометрических наблюдений	92
Глава V. Формирование поверхностного стока	93
§ 1. Основные предпосылки к выявлению механизма процессов стока . .	93
§ 2. Основные закономерности в процессах поверхностного стока. Метод изохрон	97
Глава VI. Максимальный и минимальный сток	100
§ 1. Факторы весеннего половодья	100
§ 2. Факторы ливневого стока	103
§ 3. Определение максимальных расходов воды при наличии данных наблюдений	106
§ 4. Расчет максимального стока половодья при отсутствии или недостаточности гидрометрических данных	112
§ 5. Расчет максимальных расходов дождевых паводков при отсутствии данных наблюдений	120
§ 6. Расчетные расходы для проектирования осушительных систем	124
§ 7. Минимальный сток условия его формирования	126
§ 8. Расчеты минимального стока	130
Глава VII. Климатические факторы стока	135
§ 1. Влажность воздуха	135
§ 2. Испарение	139
§ 3. Осадки	156
§ 4. Климатические факторы и годовой сток	164

Часть II. Регулирование стока

Глава I. Задачи и виды регулирования стока	168
§ 1. Понятие о регулировании стока	168
§ 2. Виды регулирования стока	171
§ 3. Расчетная обеспеченность при регулировании стока	175
Глава II. Водохранилища	177
§ 1. Типы плотинных водохранилищ	177
§ 2. Основные емкости и нормативные уровни водохранилища	179
§ 3. Учет ветрового волнения при назначении отметок гребня сооружения .	183
§ 4. Характеристики водохранилища	188
Глава III. Потери воды из водохранилищ	193
§ 1. Учет потерь воды на дополнительное испарение	193
§ 2. Определение суммарных потерь на фильтрацию	197
§ 3. Ледообразование и другие потери воды	199
§ 4. Мероприятия по уменьшению потерь воды	201
Глава IV. Заиление водохранилищ	201
§ 1. Методика расчета заиления водохранилищ	205
§ 2. Понятие о переформировании берегов водохранилища	215
§ 3. Мероприятия по уменьшению заиления	216
Глава V. Общая методика расчетов регулирования стока	217
§ 1. Балансовые таблично-цифровые расчеты	220
§ 2. Графические балансовые расчеты	224
§ 3. Учет коррелятивных связей между стоком смежных отрезков времени .	230
Глава VI. Сезонно-годовое и многолетнее регулирование стока	232
§ 1. Методика расчета	232
§ 2. Сезонная емкость водохранилища многолетнего регулирования	236
§ 3. Многолетнее регулирование стока	238

§ 4. Метод вероятностных расчетов С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля	239
§ 5. Метод вероятных вариантов А. Д. Саваренского	246
Глава VII. Специальные вопросы расчетов регулирования стока	253
§ 1. Регулирование стока на переменные оросительные нормы	253
§ 2. Компенсирующее регулирование стока	255
Глава VIII. Регулирующее влияние водохранилищ на максимальные расходы воды	257
§ 1. Расчеты регулирования половодий	261
§ 2. Упрощенные методы расчетов трансформации паводков	264
§ 3. Приближенный расчет регулирующего влияния вышерасположенных водохранилищ	267
Глава IX. Эксплуатация водохранилищ	269
§ 1. Задачи службы эксплуатации	269
§ 2. Диспетчерские графики	273
§ 3. Наблюдения за состоянием водохранилища	276
Приложение	279
Литература	284